

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Майкут Сергій Олексійович

Гриф

Прим. № \_\_\_\_

УДК 621.389; 621.3.01

УДК 621.385

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

Фізико-топологічне моделювання приладів з ВЧ концентрацією  
електромагнітного поля

171 – Електроніка

17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

С. О. Майкут

Науковий керівник

Цибульський Леонід Юрійович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

Майкут С.О. Фізико-топологічне моделювання приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

**Актуальність роботи.** Робота пристроїв вакуумно-плазмової і потужної електроніки базуються на використанні електромагнітного керування формою та напрямом електронного потоку. До них відносяться індукційні пристрої для випаровування матеріалів з подальшою іонізацією, газорозрядні та вакуумні комутатори тощо. Зазвичай магнітне поле у цих пристроях створюється за допомогою ВЧ індукторів, які потребують узгодження електричних параметрів з джерелом живлення, електромагнітних та конструкційних параметрів з іншими функціональними елементами приладів та пристроїв. Обмеження, яке накладається на робочі частоти ВЧ приладів, та протиріччя узгодження параметрів можна усунути використанням додаткового елемента – ВЧ концентратора електромагнітного поля. Використання ВЧ концентратора магнітного поля дозволяє:

- узгодити імпеданси електричного джерела і індуктора і, як наслідок, зменшити витрати потужності на генерацію керуючих магнітних полів;
- розширити діапазон керованості напруженістю електричного та магнітного полів;
- підвищити ефективність керування формою та напрямом електронного потоку.

Хоча ВЧ концентратори магнітного поля використовуються у ряді технологічних установок, наприклад, для закалювання деталей, сортуванні металів, тощо, однак тривають пошуки нових принципів їх застосування та оптимізації конструкції.

Широке впровадження ВЧ концентраторів в якості елементу керування формою та напрямом електронного потоку в електронних приладах та пристроях стримується відсутністю розвинутих в достатній мірі методів комп'ютерного дослідження пов'язаних фізичних явищ, до яких відносяться електромагнітні, електротермічні, термо- та гідродинамічні та вакуумно-плазмові, електронно-променеві тощо. Спостерігається недостатній рівень освоєння математичного апарату та програмних алгоритмів для вивчення характеру і закономірностей протікання пов'язаних процесів в таких приладах та пристроях. Наявність таких методів могло б стати передумовою для проектування приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, прогнозування їх можливостей, виявило б шляхи отримання необхідних характеристик, розширило б науково-фізичні уявлення і рамки технічної та виробничої застосовності конкретних видів приладів.

Для мультифізичного дослідження електронних приладів доцільно використовувати фізико-топологічні моделі, які на базі сучасних комп'ютерних технологій дозволяють найбільш повно встановити вплив конструктивних особливостей на пов'язані фізичні процеси, на експлуатаційні параметри та характеристики. Розв'язок задач може відбуватися для стаціонарного і нестаціонарного режимів.

Фізико-топологічні моделі є складовою систем автоматизованого проектування і широко використовуються для дослідження електронних приладів та пристроїв. В галузі електроніки над розробкою фізико-топологічного моделювання працювали закордонні автори Д. Хьюз, Д. Мичтом, Д. Химмельблау, Є.В. Авдєєв, І.П. Норенков, П.А. Зіновєв, Ю.Р. Носов, Б. В. Баталов та українські автори В.П. Сігорський, А.І. Петренко, Р. П. Базилевич, А.І. Кузьмичєв, І.Н. Кучерява та інші.

Розвиток методів розрахунку параметрів приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля з урахуванням структурної ієрархії і особливостей протікання пов'язаних фізичних процесів на базі фізико-топологічних моделей та розробка математичних моделей для тривимірного дослідження таких пристроїв є важливою науковою задачею. Її актуальність підтверджується також потребами практичного використання та модернізації електронних технологічних пристроїв та

потужних комутаційних приладів і реалізації їх раціональних режимів експлуатації.

У даній роботі пропонується поглиблене рішення перерахованих вище задач. Розробка та поліпшення методів розрахунку електромагнітного поля і пов'язаних з ним фізичних процесів в елементах електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів шляхом тривимірного моделювання з метою подальшого удосконалення та забезпечення надійної експлуатації їх, являє собою вирішення важливої науково-прикладної задачі, а тема дисертаційної роботи, яка вирішує таку проблему, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках наступних наукових проектів, що відповідають напрямкам цільової програми наукових досліджень НАНУ «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» (п. 4. «Низькотемпературна плазма і технології на її основі»):

– НДДКР «Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок», державний реєстраційний номер: 0115U006750 (термін виконання 2015 - 2018 рр.);

– НДДКР "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення», державний реєстраційний номер: 0119U103973 (термін виконання 2019 – 2022 рр.).

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка удосконалених фізико-топологічних і математичних моделей для чисельного розрахунку тривимірних електромагнітних полів при дослідженні їх розповсюдження в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля і аналіз пов'язаних з ними процесів різної фізичної природи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні наукові та практичні задачі.

1. Аналіз особливостей фізико-топологічного моделювання та обґрунтування доцільності його розвитку і застосування для чисельного розрахунку тривимірного електромагнітного поля і пов'язаних з ним процесів різної фізичної природи в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля зі складною внутрішньою ієрархічною структурою.

2. Розробка нової фізико-топологічної моделі та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в індукційному випарнику з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, тиглі, матеріалі завантаження для випаровування та іонізації при температурі випаровування, потоці електронів.

3. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами індукційного випарника з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного температурного поля в тиглі з завантаженням при температурі випаровування різних матеріалів.

4. Встановлення зв'язку між електричними потенціалами на елементах індукційного випарника з концентратором електромагнітного поля з параметрами електронного потоку, який емітує з поверхні тигля з завантаженням при температурі випаровування.

5. Розробка нових фізико-топологічних моделей та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в потужних комутаторах струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, проміжку між електродами, емісії та потоці електронів.

6. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами вакуумного переривника струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного електричного та магнітного полів, та ефективністю керування електронним потоком.

*Об'єкт дослідження:* прилади з ВЧ концентрацією магнітного поля для випаровування матеріалів та іонізації їх парового потоку, газорозрядні та вакуумні комутатори.

*Предмет дослідження:* тривимірні фізико-топологічні моделі, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри пристроїв, траєкторії руху електронів.

*Методи дослідження:* методи математичної фізики, фізико-топологічного моделювання і чисельного розрахунку для розробки та дослідження тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля – випарника, вимикача та переривника струму і визначення шляхів удосконалення їх конструкції.

**Наукова новизна результатів**, отриманих автором, полягає у наступному:

- **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного випарника з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження режимів випаровування металів та емісії електронів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів на енергетичну ефективність приладу.

- **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного переривника струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

- **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного вимикача струму з площинними електродами та ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та встановити величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

- **Отримали подальший розвиток** методи ієрархічного тривимірного фізико-топологічного моделювання приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля

шляхом чисельних розрахунків пов'язаних мультифізичних процесів в єдиному розрахунковому просторі;

– На підставі розрахунків за допомогою тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля встановлено, що:

1. Використання ВЧ концентратора електромагнітного поля в якості аноду у вакуумному переривнику струму удосконаленої конструкції дозволяє здійснювати ефективне розмикання при 50 А імпульсу струму відсікання на керівному індукторі і 300 вольтх на колекторах.

2. При збільшенні кількості радіальних щілин у нижньому контакті вакуумного переривника струму з 1 до 8, струм відсікання зменшується на 57 %

3. При трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, яка виділяється у випарнику на 12,3% більше ніж у випарника з трансформаторним з'єднанням індуктора і концентратора.

4. Неоднорідність температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму живлення і становить 2 К при діаметрі тигля 32 мм. Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні  $0,0013 \div 0,002$ .

5. Встановлено, що на відстані  $40 \div 50$  мм над тиглем випарника електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді.

6. Вперше встановлено, що у випарнику з ВЧ концентрацією магнітного поля, не залежно від діаметру тигля і його положення в концентраторі, температура на поверхні випаровування може вважатися однаковою з похибкою не більше 0,5 %.

7 При автотрансформаторній конструкції випарника з концентрацією електромагнітної енергії розрахована напруга на індукторі, яка при частоті 440 кГц забезпечує робочу температуру випаровування 1545 К (для міді) становить 273 В.

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів** забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, алгоритмів фізико-

топологічного моделювання пов'язаних фізичних процесів та алгоритмів чисельних розрахунків, а також верифікацією результатів чисельних розрахунків по аналітичним тестовим розрахункам.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в наступному: розроблені та удосконалені тривимірні фізико-топологічні моделі пов'язаних фізичних процесів у вакуумному випарнику, вакуумному вимикачі та перервнику струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для вирішення задач ефективного керування електронними потоками. Розроблені фізико-топологічні моделі дозволяють проводити розрахунок пов'язаних фізичних процесів в єдиному розрахунковому середовищі: протікання струму по індуктору з урахуванням скін-ефекту, розподіл електромагнітного поля в межах приладу, індукцію струмів в елементах випарника, нагрівання тигля з завантаженням та трасування руху електронів. Розрахунок дозволяє встановити вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів на електродинамічні, термодинамічні, емісійні та електронно-променеві характеристики приладів.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Серед 4 публікації у фахових виданнях 1 стаття написана здобувачем одноосібно [5]. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати. В роботі [2] здобувачем проведено огляд застосування пристроїв індукційного нагріву в технології мікро- і нанодисперсних матеріалів. В роботі [3] здобувачем розроблено фізико-топологічну модель плоского діода з плоским індуктором для, дослідження ефекту відсічення електронів у плоскому діоді магнітним полем зовнішнього плоского індуктора на прикладі вакуумних вимикачів з плоскими контактами. У роботі [4] здобувач виконав моделювання та дослідження ефекту магнітної відсічення катодних електронів від анода в заключний період переривання струму - на стадії деіонізації плазми і конденсації металевих пар, коли катод ще здатний випускати електрони за рахунок залишкової термоелектронної емісії і вторинної  $\gamma$ -емісії через бомбардування катода залишковими іонами.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 14 робіт, з яких 4 – це статті у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових



видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав (2 включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 1 – публікації у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних). Також мається один патент на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 175 сторінок, у тому числі: 136 сторінок основного тексту, 70 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел із 158 найменувань на 15 сторінках.

**Ключові слова:** фізико-топологічна модель, моделювання високочастотного нагріву, індукційний випарник, чисельні методи, відсічення електронів в магнітному полі, схрещені електромагнітні поля, вакуумний вимикач, перервник струму.

## SUMMARY

Maikut S.O. Physico-topological simulation of devices with HF electromagnetic field concentration. – Qualifying scientific work, the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the field of knowledge 17 Electronics and telecommunications in specialty 171 Electronics. - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The operation of vacuum-plasma and powerful electronics devices is based on the use of electromagnetic control of the shape and direction of the electronic flow. These include induction devices for evaporation of materials with subsequent ionization, gas discharge and vacuum switches and the like. Typically, the magnetic field in these devices is created by RF inductors, which require the coordination of electrical parameters with the power supply, electromagnetic and structural parameters with other functional elements of devices and devices. The limitation imposed on the operating frequencies of RF devices and the contradiction of the coordination of parameters can be eliminated by using an additional element - RF concentrator of the electromagnetic field. The use of RF magnetic field concentrator allows:

- match the impedances of the electric source and inductor and, as a consequence, reduce the power consumption for the generation of control magnetic fields;
- expand the range of controllability of electric and magnetic fields;
- increase the efficiency of control of the form and direction of the electronic flow.

Although HF magnetic field concentrators are used in a number of technological installations, for example, for hardening of parts, sorting of metals, etc., but the search for new principles of their application and design optimization continues.

Widespread introduction of RF concentrators as a control element of the shape and direction of electronic flow in electronic devices and devices is constrained by the lack of sufficiently developed methods of computer research of related physical phenomena, which include electromagnetic, electrothermal, thermo- and hydrodynamic and vacuum-

plasma , electron beam, etc. There is an insufficient level of mastering the mathematical apparatus and software algorithms to study the nature and patterns of related processes in such devices and devices. The presence of such methods could be a prerequisite for the design of devices with RF electromagnetic field concentration, forecasting their capabilities, would identify ways to obtain the necessary characteristics, would expand scientific and physical ideas and technical and industrial applicability of specific types of devices.

For multiphysical research of electronic devices it is expedient to use physical and topological models which on the basis of modern computer technologies allow to establish most completely influence of design features on the connected physical processes, on operational parameters and characteristics. Problems can be solved for stationary and non-stationary modes.

Physico-topological models are part of computer-aided design systems and are widely used for the study of electronic devices and devices. In the field of electronics, foreign authors D. Hughes, D. Mitch, D. Himmelblau, E.V. Avdeev, IP Norenkov, PA Zinoviev, Yu.R. Nosov, BV Batalov and Ukrainian authors VP Sigorsky, AI Petrenko, RP Bazilevich, AI Kuzmichev, IN Curly and others.

The development of methods for calculating the parameters of devices with RF electromagnetic field concentration taking into account the structural hierarchy and features of related physical processes based on physico-topological models and the development of mathematical models for three-dimensional study of such devices is an important scientific task. Its relevance is also confirmed by the needs of practical use and modernization of electronic technological devices and powerful switching devices and the implementation of their rational modes of operation.

This paper proposes an in-depth solution of the above problems. Development and improvement of methods for calculating the electromagnetic field and related physical processes in the elements of electronic technological devices and powerful switching devices by three-dimensional modeling to further improve and ensure reliable operation, is a solution of an important scientific problem, and the topic of the dissertation , which solves this problem, is relevant.

**Relationship with academic programs, plans, themes.** The work was performed at the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in the framework of the following research projects within the framework of the following scientific projects corresponding to the directions of the target program of scientific researches of NASU «Perspective researches on physics of plasma, controlled thermonuclear fusion and plasma technologies» (item 4. «Low-temperature plasma and technologies on its basis»):

- R&D «Physical and topological mathematical modeling of sources of charged and neutral particles», state registration number: 0115U006750 (2015 – 2018);
- R&D "Study of electrodynamic effects in devices of vacuum and plasma electronics for technological purposes", state registration number: 0119U103973 (2019 – 2022).

**The purpose and objectives of the study.** The purpose of the dissertation is to develop advanced physico-topological and mathematical models for numerical calculation of three-dimensional electromagnetic fields in the study of their propagation in elements of devices with HF magnetic field concentration and analysis of related processes of different physical nature.

To achieve this goal it is necessary to solve the following main scientific and practical problems.

1. Analysis of peculiarities of physical and topological modeling and substantiation of expediency of its development and application for numerical calculation of three-dimensional electromagnetic field and related processes of different physical nature in elements of devices with RF concentration of magnetic field with complex internal hierarchical structure.

2. Development of a new physical and topological model and development of software for three-dimensional calculation of related physical processes in an induction evaporator with a HF electromagnetic field concentrator with sequential consideration of levels of structural hierarchy - inductor, HF hub, crucibles, loading material for evaporation and ionization evaporation temperature, electron flow.

3. Establishing a relationship between the design parameters of the induction evaporator with a HF electromagnetic field concentrator with the structure of a three-

dimensional temperature field in a crucible with loading at the evaporation temperature of different materials.

4. Establishing a connection between electric potentials on the elements of the induction evaporator with an electromagnetic field concentrator with the parameters of the electron flow emitted from the surface of the crucible with loading at the evaporation temperature.

5. Development of new physical and topological models and development of software for three-dimensional calculation of related physical processes in powerful current switches with HF electromagnetic field concentrator with sequential consideration of levels of structural hierarchy - inductor, HF hub, gap between electrodes, emission and electron flux .

6. Establishing a connection between the design parameters of a vacuum circuit breaker with a HF electromagnetic field concentrator with the structure of three-dimensional electric and magnetic fields, and the efficiency of electronic flow control.

*Object of research:* devices with HF magnetic field concentration for evaporation of materials and ionization of their steam flow, gas-discharge and vacuum switches.

*Subject of research:* three-dimensional physical and topological models, structural, technological and electrophysical parameters of devices, trajectories of electrons.

*Research methods:* methods of mathematical physics, physical and topological modeling and numerical calculation for development and research of three-dimensional physical and topological models of vacuum devices with RF concentration of magnetic field - evaporator, switch and circuit breaker and determination of ways to improve their design.

**The scientific novelty of the results obtained by the author is as follows:**

– **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of a vacuum evaporator with HF magnetic field concentration was developed to study the modes of metal evaporation and electron emission, which allows to establish the influence of design parameters on the energy efficiency of the device.

– **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of a vacuum circuit breaker with HF magnetic field concentration was developed to study the trajectories of electrons in the gap between electrodes in a cross electromagnetic field

taking into account eddy currents induced in electrodes and boundary effects. and the magnitude of the critical induction of the magnetic field to cut off the electrons from the anode.

- **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of vacuum circuit breaker with planar electrodes and HF magnetic field concentration was developed to study the trajectories of electrons in the gap between electrodes in a cross electromagnetic field taking into account eddy induced currents in electrodes the direction of the electron flux and set the value of the critical induction of the magnetic field to cut off the electrons from the anode.

- Methods of hierarchical three-dimensional physical and topological modeling of devices with HF magnetic field concentration by numerical calculations of related multiphysical processes in a single computational **space were further developed;**

- Based on calculations using three-dimensional physical and topological models of vacuum devices with RF magnetic field concentration, it is established that:

1. The use of RF concentrator of the electromagnetic field as an anode in a vacuum circuit breaker of advanced design allows effective opening at 50 A pulse of the cut-off current on the control inductor and 300 volts on the collectors.

2. With increasing number of radial slits in the lower contact of the vacuum circuit breaker from 1 to 8, the cut-off current decreases by 57%

3. With the transformer type of evaporator in the crucible 3% more power is released than with the autotransformer. At the same time, the total power released in the evaporator is 12.3% more than in the evaporator with a transformer connection of the inductor and concentrator.

4. Heterogeneity of temperature on the loading surface weakly depends on the frequency of the supply current and is 2 K with a crucible diameter of 32 mm. If we accept the condition of the isothermal evaporation surface, then the absolute error of the calculations of the emission characteristics of the evaporator, for all considered design options, will be at the level of  $0.0013 \div 0.002$ .

5. It is established that at a distance of  $40 \div 50$  mm above the crucible of the evaporator electrons acquire energy sufficient for ionization of copper atoms.

6. For the first time it was found that in an evaporator with RF concentration of magnetic field, regardless of the diameter of the crucible and its position in the concentrator, the temperature on the evaporation surface can be considered the same with an error of not more than 0.5%.

7 With the autotransformer design of the evaporator with the concentration of electromagnetic energy, the calculated voltage on the inductor, which at a frequency of 440 kHz provides an operating evaporation temperature of 1545 K (for copper) is 273 V.

**The validity and reliability of scientific results** is ensured by the correct application of the mathematical apparatus, algorithms of physical and topological modeling of related physical processes and algorithms of numerical calculations, as well as verification of the results of numerical calculations by analytical test calculations.

**The practical significance of the obtained results** is as follows: developed and improved three-dimensional physico-topological models of related physical processes in a vacuum evaporator, vacuum circuit breaker and current circuit breaker with RF magnetic field concentration to solve problems of effective electronic flow control. The developed physical and topological models allow to calculate the related physical processes in a single computing environment: current flow through the inductor taking into account the skin effect, distribution of electromagnetic field within the device, induction of currents in the evaporator elements, heating the crucible with loading and tracing electron motion. The calculation allows to establish the influence of design and operational parameters on the electrodynamic, thermodynamic, emission and electron-beam characteristics of the devices.

**Personal contribution of the applicant.** All the results of the dissertation were obtained by the author personally. Among 4 publications in professional publications, 1 article was written by the applicant alone [5]. In co-authored publications, the applicant has the following results. In [2], the applicant reviewed the use of induction heating devices in the technology of micro- and nanodisperse materials. In [3], the applicant developed a physico-topological model of a flat diode with a flat inductor to study the effect of electron cut-off in a flat diode by a magnetic field of an external flat inductor on the example of vacuum switches with flat contacts. In [4], the applicant performed modeling and study of the effect of magnetic cut-off of cathode electrons from the anode

in the final period of current interruption - at the stage of plasma deionization and metal vapor condensation, when the cathode is still able to emit electrons due to residual thermoelectron emission and secondary  $\gamma$ -emission cathode residual ions.

**Publications.** Based on the dissertation, 14 works were published, 4 of which are articles in journals and collections of scientific papers included in the list of professional publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the dissertation or in periodicals of foreign countries (2 included in the international scientometric database SCOPUS), and 1 - publications in conference proceedings (including international ones). There is also one utility model patent.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an annotation, introduction, four sections, conclusions, a list of used sources and appendices. The work contains 175 page, including: 136 page of the main text, 70 figures, 18 tables, the list of the used sources from 158 names on 15 pages.

**Key words: RF:** physical and topological model, simulation of high-frequency heating, induction evaporator, numerical methods, electron cut-off in a magnetic field, crossed electromagnetic fields, vacuum switch, current circuit breaker.

### Список публікацій автора

Статті:

1. Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., Майкут С.А., Дрозд И.М. «Индукционно-термический метод получения микро- и наночастиц». Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, 15:1 (2017): 141-162.
2. Майкут С.А., Дрозд И.М., Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю.,»Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора». Електроніка та зв'язок, 22:4 (2017): 11-17.
3. I. Drozd, A. Kuzmichev, S. Maikut, L. Tsybulsky. «Investigation of electron cut-off in a cylindrical electrode system in pulsed magnetic field of an inductor». PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY.Series: Plasma Physics, 118:6 (2018): 281-284
4. Майкут С.А. «Кинетика электронов в цилиндрической системе с импульсным магнитным полем». East European Scientific Journal, 50:10 (2019): 27-33



Тези доповідей:

1. С.О. Майкут, Л.Ю. Цибульский. Моделювання індукційного випарника з концентратором електромагнітного поля / // Труды 5-й конф. «Електроніка та інформаційні технології» (Чинадієво Закарпатської обл.). – 2013. – С. 145-148.
2. 9-я конференция, “Вакуумная техника, материалы и технология” (Россия, Москва, КВЦ «СОКОЛЬНИКИ», 2014, 15 – 17 апрель). Моделирование процессов в индукционном испарителе с концентратором электромагнитного поля / С.А. Майкут, Д.В. Ткаченко, Л.Ю. Цибульский // Труды конф. С. 105-108.
3. S. Maikut, Y. Bashkatov, L. Tsybulskiy, A. Kuzmichev. «Simulation of induction evaporator with magnetic field concentrator». IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, microwave, and terahertz applications, NEMO-2014 Papers (Flash): paper 185, 4 pages
4. XII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» (Kiyv, Ukraine, October 19-22, 2016). CALCULATION OF VAPOR FLOW DENSITY OVER INDUCTION EVAPORATOR // Maikut S.,L. Tsibulskiy A., Loktionov
5. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульский. «Моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». XI науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки" Київ, НТУУ «КПІ». – 2017. 6 – 7 квітня
6. С. Майкут, Л. Цибульский. «Проблеми моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». ДНІ НАУКИ ФСП. ЛЮДИНА У ВИМІРАХ СУЧАСНИХ СУСПІЛЬНИХ (Київ, НТУУ «КПІ». 2017. -20 - 21 травня)
7. С. Майкут, И. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульский. «МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА С МАГНИТНЫМ ГАШЕНИЕМ ВАКУУМНОЙ ДУГИ». XXV International Workshop on Charged Particle Accelerators\_-Ukraine, Kharkov\_-September 18-22, 2017.

8. S. Maikut, L. Tsibulskiy, I. Drozd, A. Kuzmichev. «ANALYSIS OF ELECTRON TRAJECTORIES IN THE TWO-ELECTRODE SYSTEM OF A VACUUM CURRENT BREAKER WITH MAGNETIC CONTROL». XIII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» - Call for Papers - Kyiv, Ukraine\_24-27.10.17
9. Дрозд И.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.И., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.. «Моделирование вакуумного коммутатора тока с анодом в виде индуктора Матеріали». XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 4 квітня 2019 р.
10. Дрозд И.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.И., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський. «Моделирование процесса відсічення електронів у вакуумних переривниках струму із застосуванням концентраторів магнітного поля». Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2019. Київ, 11-12 грудня 2019 р.

#### Патенти:

1. Патент України на корисну модель UA 141529 U, H01H 33/66. Вакуумний вимикач / А.І. Кузьмичев, Л.Ю. Цибульський, С.О. Майкут. – № u201910589; заявл. 25.10.2019; опубл. 10.04.2020. – Бюл. № 7/2019

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 .....	31
ПРИСТРОЇ З КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	31
1.1 Концентрація електромагнітного поля .....	31
1.2 Використання індукторів для концентрації магнітного поля.....	33
1.3 Використання ВЧ концентраторів магнітного поля а наукових дослідженнях.....	35
1.4 Прилади з ВЧ концентрацією магнітного поля технологічного призначення.....	45
1.4.1 Індукційне плавлення та випаровування матеріалів .....	47
1.4.2 Індукційне нагрівання деталей .....	51
1.5 Висновки по розділу .....	56
РОЗДІЛ 2 .....	58
ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЛАДІВ З ВЧ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	58
2.1 Місце фізико-топологічних моделей у фізичному та математичному дослідженні.....	58
2.1.1 Алгоритми розрахунку фізико-топологічних моделей .....	59
2.1.2 Математичні моделі фізичних процесів.....	60
2.1.3 Визначення початкових та граничних умов розрахунку пов'язаних фізичних задач.....	65
2.2 Застосування прикладних пакетів для розрахунків фізико- топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля ..	68
2.2.1. Методи скінчених різниць і скінчених елементів при розрахунку електромагнітних полів. ....	69
2.2.2 Похибка чисельних розрахунків моделей при аналізі процесів в за фізико-топологічними моделями .....	71
2.3 Структура та склад фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля .....	73
2.3.1 Загальні ознаки структури та складу фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля .....	73
2.3.2 Фізико-математична комбінована модель електромагнітного поля і поля струмів.....	75
2.3.3. Фізико-математична модель теплообміну у тиглі з завантаженням .....	81
2.3.5 Фізико-математична модель парового потоку з вакуумного випарника .....	88
2.3.6 Фізико-математична модель іонізації парового потоку .....	91
2.3.7 Фізико математична модель електричного поля .....	92
2.3.8 Фізико-математична модель емісії електронів .....	94
2.3.9 Розрахунок траєкторії електронів в електромагнітному полі компонентів приладів .....	96
2.3.10 Фізико-математична модель процесів іонізації .....	98
2.4 Висновки до розділу і постановка задачі дослідження .....	101

РОЗДІЛ 3 .....	104
ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ВАКУУМНОМУ ВИПАРНИКУ З КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ .....	104
3.1 Конструкція індукційного випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля .....	105
3.2. Постановка задачі моделювання випарника .....	107
3.3 Фізико-топологічна модель випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля .....	109
3.4 Розрахунок поля струмів у компонентах випарника.....	111
3.5 Розрахунок температурного поля в тиглі з завантаженням .....	115
3.6 Аналіз енергоефективності випарника .....	120
3.7 Трасування траєкторій електронів .....	122
3.9 Експериментальне дослідження індукції магнітного поля у випарнику .....	124
3.10 Висновки до розділу.....	128
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПОТУЖНИХ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДАХ .....	131
4.1 Дослідження відсічки електронів в плоскому діоді магнітним полем плоского індуктора з концентратором .....	131
4.1.1 Ефект відсічення електронів .....	131
4.1.2 Фізика процесу відсічення .....	133
4.1.3 Конструкція вимикача.....	134
4.1.4 Фізико-топологічна математична модель ВВ .....	135
4.1.5 Результати моделювання .....	137
4.2 Моделювання магнітного гасіння вакуумної дуги полем анода- концентратора .....	140
4.2.1 Принцип дії вакуумного переривника струму .....	141
4.2.2 Електродні структури переривника струму .....	144
4.2.3 Математична модель переривника струму .....	145
4.2.4 Результати розрахунків .....	147
4.3 Висновки до розділу.....	153
ВИСНОВКИ .....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	159
ДОДАТКИ .....	174

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВЧ – високочастотний;

МСП – метод скінченних різниць;

МСЕ – метод скінченних елементів;

PIC – particle-in-cell;

СЛ – струмова лінія;

ВВ – вакуумний вимикач;

НВЧ – надвисокочастотний;

ПС – перервник струму;

МП – магнітне поле.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Робота пристроїв вакуумно-плазмової і потужної електроніки базуються на використанні електромагнітного керування формою та напрямом електронного потоку. До них відносяться індукційні пристрої для випаровування матеріалів з подальшою іонізацією, газорозрядні та вакуумні комутатори тощо. Зазвичай магнітне поле у цих пристроях створюється за допомогою ВЧ індукторів, які потребують узгодження електричних параметрів з джерелом живлення, електромагнітних та конструкційних параметрів з іншими функціональними елементами приладів та пристроїв. Обмеження, яке накладається на робочі частоти ВЧ приладів, та протиріччя узгодження параметрів можна усунути використанням додаткового елемента – ВЧ концентратора електромагнітного поля. Використання ВЧ концентратора магнітного поля дозволяє:

- узгодити імпеданси електричного джерела і індуктора і, як наслідок, зменшити витрати потужності на генерацію керуючих магнітних полів;
- розширити діапазон керованості напруженістю електричного та магнітного полів;
- підвищити ефективність керування формою та напрямом електронного потоку.

Хоча ВЧ концентратори магнітного поля використовуються у ряді технологічних установок, наприклад, для закалювання деталей, сортуванні металів, тощо, але тривають пошуки нових принципів їх застосування.

Широке впровадження ВЧ концентраторів в якості елемента керування формою та напрямом електронного потоку в електронних приладах та пристроях стримується відсутністю розвинутих в достатній мірі методів комп'ютерного дослідження пов'язаних фізичних явищ, до яких відносяться електромагнітні, електротермічні, термо- та гідродинамічні та вакуумно-плазмові, електронно-променеві тощо. Спостерігається недостатній рівень освоєння математичного апарату та програмних алгоритмів для вивчення характеру і закономірностей протікання пов'язаних процесів в таких приладах та пристроях. Наявність таких

методів могло б стати передумовою для проектування приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, прогнозування їх можливостей, виявило б шляхи отримання необхідних характеристик, розширило б науково-фізичні уявлення і рамки технічної та виробничої застосовності конкретних видів приладів.

Для мультифізичного дослідження електронних приладів доцільно використовувати фізико-топологічні моделі, які на базі сучасних комп'ютерних технологій дозволяють найбільш повно встановити вплив конструктивної особливості на пов'язані фізичні процеси, на експлуатаційні параметри та характеристики. Сучасне прикладне програмне забезпечення дозволяє розраховувати пов'язані фізичні процеси в стаціонарному і нестаціонарному режимах. Одним із лідерів, програмні пакети якого широко використовуються в світі для розрахунків пов'язаних фізичних процесів, є пакет програм мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics.

Фізико-топологічні моделі є складовою систем автоматизованого проектування і широко використовуються для дослідження електронних приладів та пристроїв. В галузі електроніки над розробкою фізико-топологічного моделювання працювали закордонні автори Д. Хьюз, Д. Мичтом, Д. Химмельблау, Є.В. Авдєєв, І.П. Норенков, П.А. Зіновєв, Ю.Р. Носов, Б. В. Баталов та українські автори В.П. Сігорський, А.І. Петренко, Р. П. Базилевич, А.І. Кузьмичєв, І.Н. Кучерява та інші.

Розробка фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля призначених для тривимірного дослідження процесів випаровування та іонізації матеріалів, процесів магнітного керування формою та напрямом електронного потоку у газорозрядних та вакуумних комутаторах дозволяє оптимізувати конструкційні, технологічні та електрофізичні параметри таких приладів. Проведення наукових досліджень пов'язаних фізичних процесів у приладах з ВЧ концентрацією електромагнітного поля на основі фізико-топологічних моделей є актуальною задачею яка дозволяє встановити зв'язок між конструктивними та експлуатаційними параметрами.

Розвиток методів розрахунку параметрів приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля з урахуванням структурної ієрархії і особливостей

протікання пов'язаних фізичних процесів на базі фізико-топологічних моделей, розробка математичних моделей для тривимірного дослідження таких пристроїв є важливою науковою задачею. Актуальність такої задачі підтверджується також потребами практичного використання та модернізації електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів і реалізації їх раціональних режимів експлуатації.

У даній роботі пропонується поглиблене рішення перерахованих вище задач, включаючи розробку фізико-топологічних моделей електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів для тривимірного аналізу в них пов'язаних фізичних процесів різної природи, практичних рекомендацій і впровадження результатів дослідження.

Розрахунок електромагнітного поля і пов'язаних з ним фізичних процесів в елементах електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів на основі методу тривимірного моделювання з метою подальшого удосконалення та забезпечення надійної експлуатації їх, являє собою вирішення важливої науково-прикладної задачі, а тема дисертаційної роботи, яка вирішує таку проблему, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках наступних наукових проектів:

– НДДКР Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок. Державний реєстраційний номер: 0115U006750 Факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (2015 - 2018 рр.)

– НДДКР "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення Державний реєстраційний номер: 0119U103973 Факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (2019 – 2022 рр.)



**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка удосконалених фізико-топологічних і математичних моделей для чисельного розрахунку тривимірних електромагнітних полів при дослідженні їх розповсюдження в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля і аналіз пов'язаних з ними процесів різної фізичної природи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні наукові та практичні задачі.

1. Аналіз особливостей фізико-топологічного моделювання та обґрунтування доцільності його розвитку і застосування для чисельного розрахунку тривимірного електромагнітного поля і пов'язаних з ним процесів різної фізичної природи в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля зі складною внутрішньою ієрархічною структурою.

2. Розробка нової фізико-топологічної моделі та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в індукційному випарнику з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, тиглі, матеріалі завантаження для випаровування та іонізації при температурі випаровування, потоці електронів.

3. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами індукційного випарника з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного температурного поля в тиглі з завантаженням при температурі випаровування різних матеріалів.

4. Встановлення зв'язку між електричними потенціалами на елементах індукційного випарника з концентратором електромагнітного поля з параметрами електронного потоку, який емітує з поверхні тигля з завантаженням при температурі випаровування.

5. Розробка нових фізико-топологічних моделей та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в потужних комутаторах струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, проміжку між електродами, емісії та потоці електронів.

6. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами вакуумного переривника струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного електричного та магнітного полів, та ефективністю керування електронним потоком.

*Об'єкт дослідження:* прилади з ВЧ концентрацією магнітного поля для випаровування матеріалів та іонізації їх парового потоку, газорозрядні та вакуумні комутатори.

*Предмет дослідження:* тривимірні фізико-топологічні моделі, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри пристроїв, траєкторії руху електронів.

*Методи дослідження:* методи математичної фізики, фізико-топологічного моделювання і чисельного розрахунку для розробки та дослідження тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля – випарника, вимикача та переривника струму і визначення шляхів удосконалення їх конструкції.

**Наукова новизна результатів**, отриманих автором, полягає у наступному:

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного випарника з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження режимів випаровування металів та емісії електронів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів на енергетичну ефективність приладу.

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного переривника струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного вимикача струму з площинними електродами та ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих

струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та встановити величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

– **Отримали подальший розвиток** методи ієрархічного тривимірного фізико-топологічного моделювання приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля шляхом чисельних розрахунків пов'язаних мультифізичних процесів в єдиному розрахунковому просторі;

– На підставі розрахунків за допомогою тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля встановлено, що:

1. Використання ВЧ концентратора електромагнітного поля в якості аноду у вакуумному переривнику струму удосконаленої конструкції дозволяє здійснювати ефективне розмикання при 50 А імпульсу струму відсікання на керівному індукторі і 300 вольтх на колекторах.

2. При збільшенні кількості радіальних щілин у нижньому контакті вакуумного переривника струму з 1 до 8, струм відсікання зменшується на 57 %

3. При трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, яка виділяється у випарнику на 12,3% більше ніж у випарника з трансформаторним з'єднанням індуктора і концентратора.

4. Неоднорідність температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму живлення і становить 2 К при діаметрі тигля 32 мм. Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні  $0,0013 \div 0,002$ .

5. Встановлено, що на відстані 40÷50 мм над тиглем випарника електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді.

6. Вперше встановлено, що у випарнику з ВЧ концентрацією магнітного поля, не залежно від діаметру тигля і його положення в концентраторі, температура

на поверхні випаровування може вважатися однаковою з похибкою не більше 0,5 %.

7 При автотрансформаторній конструкції випарника з концентрацією електромагнітної енергії розрахована напруга на індукторі, яка при частоті 440 кГц забезпечує робочу температуру випаровування 1545 К (для міді) становить 273 В.

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів** забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, алгоритмів фізико-топологічного моделювання пов'язаних фізичних процесів та алгоритмів чисельних розрахунків, а також верифікацією результатів чисельних розрахунків по аналітичним тестовим розрахункам.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в наступному: розроблені та удосконалені тривимірні фізико-топологічні моделі пов'язаних фізичних процесів у вакуумному випарнику, вакуумному вимикачі та перервнику струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для вирішення задач ефективного керування електронними потоками. Розроблені фізико-топологічні моделі дозволяють проводити розрахунок пов'язаних фізичних процесів в єдиному розрахунковому середовищі: протікання струму по індуктору з урахуванням скін-ефекту, розподіл електромагнітного поля в межах приладу, індукцію струмів в елементах випарника, нагрівання тигля з завантаженням та трасування руху електронів. Розрахунок дозволяє встановити вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів на електродинамічні, термодинамічні, емісійні та електронно-променеві характеристики приладів.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Серед 4 публікації у фахових виданнях 1 стаття написана здобувачем одноосібно [5]. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати. В роботі [2] здобувачем проведено огляд застосування пристроїв індукційного нагріву в технології мікро- і нанодисперсних матеріалів. В роботі [3] здобувачем розроблено фізико-топологічну модель плоского діода з плоским індуктором для дослідження ефекту відсічення електронів у плоскому діоді магнітним полем зовнішнього плоского індуктора на прикладі вакуумних вимикачів з плоскими контактами. У роботі [4] здобувач виконав моделювання та

дослідження ефекту магнітної відсічення катодних електронів від анода в заключний період переривання струму - на стадії деіонізації плазми і конденсації металевих пар, коли катод ще здатний випускати електрони за рахунок залишкової термоелектронної емісії і вторинної  $\gamma$ -емісії через бомбардування катода залишковими іонами.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на:

1. С.О. Майкут, Л.Ю. Цибульский. Моделирование индукционного выпарника с концентратором электромагнитного поля / // Труды 5-й конф. «Электроника та інформаційні технології» (Чинадієво Закарпатської обл.). – 2013. – С. 145-148.

2. 9-я конференция, “Вакуумная техника, материалы и технология” (Россия, Москва, КВЦ «СОКОЛЬНИКИ», 2014, 15 – 17 апрель). Моделирование процессов в индукционном испарителе с концентратором электромагнитного поля / С.А. Майкут, Д.В. Ткаченко, Л.Ю. Цибульский // Труды конф. С. 105-108.

3. XII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» (Kiyv, Ukraine, October 19-22, 2016). CALCULATION OF VAPOR FLOW DENSITY OVER INDUCTION EVAPORATOR // Maikut S., L. Tsibulskiy A., Loktionov

4. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульский. «Моделирование процесса отсечки электронов в выключателе тока магнитным полем индуктора». XI науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки" Київ, НТУУ «КПІ», – 2017. 6 – 7 квітня

5. С. Майкут, Л. Цибульский. «Проблеми моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». ДНІ НАУКИ ФСП. ЛЮДИНА У ВИМІРАХ СУЧАСНИХ СУСПІЛЬНИХ (Київ, НТУУ «КПІ». 2017. -20 - 21 травня)

6. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульский. «МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА С МАГНИТНЫМ ГАШЕНИЕМ ВАКУУМНОЙ ДУГИ». XXV International

Workshop on Charged Particle Accelerators\_-\_Ukraine, Kharkov\_-\_September 18-22, 2017.

7. S. Maikut, L. Tsibulskiy, I. Drozd, A. Kuzmichev. «ANALYSIS OF ELECTRON TRAJECTORIES IN THE TWO-ELECTRODE SYSTEM OF A VACUUM CURRENT BREAKER WITH MAGNETIC CONTROL». XIII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» - Call for Papers - Kyiv, Ukraine\_24-27.10.17

8. Дрозд И.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.И., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.. «Моделирование вакуумного коммутатора тока с анодом в виде индуктора Матеріали». XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 4 квітня 2019 р.

9. Дрозд И.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.И., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський. «Моделирование процесса відсічення електронів у вакуумних переривниках струму із застосуванням концентраторів магнітного поля». Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2019. Київ, 11-12 грудня 2019 р.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 14 робіт, з яких 4 – це статті у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав (2 включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 1 – публікації у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних). Також мається один патент на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 176 сторінок, у тому числі: 136 сторінок основного тексту, 66 рисунків, 23 таблиці, список використаних джерел із 158 найменувань на 15 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ПРИСТРОЇ З КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

#### 1.1 Концентрація електромагнітного поля

В загальному розумінні, під концентрацією електромагнітного поля розуміють локальне збільшення напруженості магнітного поля по відношенню до магнітного поля в оточуючому просторі за допомогою електроструму в електропровідниках. Різноманітні методи та техніка створення локального перенапруження магнітного поля базується на використанні електромагнітних явищ та на магнітних характеристиках феромагнетиків.

По перше, концентрація магнітного поля виникає в оточені місця зміни напрямку електричного струму, як суперпозиція напруженості магнітного поля при зближенні зарядів. Для використання цього явища в електротехніці використовують індуктори, які створюють локальну концентрацію магнітного поля для вирішення різноманітних задач: трансформації електричної енергії [[16,17,18], нагрівання металів для закалювання [[19,20,21], плавлення металів в металургії [22,23,24], випаровування металів з подальшою іонізацією в вакуумно-плазмових технологіях [25,26], генерації плазми [27,28], в електронних приладах для комутації струмів [29,30] та виміру фізичних величин [31-33], оптимізації роботи електричних машин [34,35], тощо. Треба відмітити, що в цих приладах та пристроях електричні заряди набувають кінетичну енергію від електричного поля, під дією якого дрейфують у робочому середовищі.

По друге, відбувається концентрація магнітного поля при взаємному зближенні електричних зарядів в складі рідини, пари або газу, що створює, як вважається, магнітне поле землі [36], сонячні плями [37-39] та використовується для отримання магнітних полів великої напруженості в наукових експериментах [40,41,42].

По-третє, концентрацію магнітного поля отримують за допомогою магнітопроводів, які здебільшого виготовляють з феромагнетиків різної конфігурації [43,44].

Існує декілька методів для збільшення концентрації магнітного поля. Наприклад, можна стиснути магнітний потік в порожнині зближенням електропровідних стінок, які її оточують. При цьому інтегральне значення магнітного потоку не зміниться, але виросте середня напруженість магнітного поля. Також концентрація магнітного поля зросте, якщо помістити в порожнину тіло з електропровідного матеріалу. Магнітний потік витісняється в проміжок між стінками порожнини і введенням в неї тілом, що призводить до зменшення перетину простору, який займає магнітний потік і зростанню середньої напруженості магнітного поля.

Тим самим, за допомогою взаємного розміщення електропровідних тіл можна регулювати магнітний потік, міняючи його геометрію і напруженість. До концентрації магнітного потоку існує сталий науковий та технічний інтерес з точки зору отримання великої напруженості магнітних полів. Можна виділити три методи концентрації магнітного потоку, які розрізняються за фізичними принципами:

1. Індуктор оточується системою провідних тіл таким чином, що створюваний ним магнітний потік «втискається» в невелику порожнину і набуває в ній високої щільності [45,46];

2. Електропровідна рідина рухається вздовж радіусу до середини об'єму, який пронизує вздовж осі магнітний потік, стискає цей магнітний потік, тобто «захоплює» магнітні силові лінії [47,48];

3. Магнітний потік оточується електропровідною оболонкою, яку швидко стискають за допомогою вибуху, збільшуючи щільність потоку в багато разів [49,50].

З точки зору технічної реалізації найбільш поширеним є перший метод, який використовує для збільшення середньої напруженості магнітного поля нерухомі елементи приладів та нерухомі середовища.

Використання приладів з концентрацією магнітного поля у кожній галузі вимагає рішення ряду різних технічних та наукових задач: визначення режимів технологічного процесу, вибір провідників для створення заданого струму, вибір ізоляторів та конструктивних матеріалів, погодження джерела струму і



навантаження за потужністю та імпедансом, визначення засобів безпеки експлуатації приладу, подолання економічних та екологічних обмежень.

## 1.2 Використання індукторів для концентрації магнітного поля

Внаслідок простоти конструкції індуктори є найпоширенішими концентраторами магнітного поля. Індуктори виготовляються у вигляді одновиткових або багатовиткових котушок електропровідного дроту будь якої форми в перетині: круглої, квадратної, еліптичної, тощо. Типова конструкція індуктора наведена на рис.1.1.

Індуктори найчастіше використовують для передачі електричної енергії від джерела до навантаження. Якщо в електромагнітне поле індуктора 1 зі змінним струмом помістити металеве тіло 2 (рис. 1.1), то за законом електромагнітної індукції змінне магнітне поле викличе появу в цьому тілі змінної електрорушійної сили (ЕРС). За законом електромагнітної індукції миттєве значення ЕРС [51]:

$$e(t) = -\partial\Phi(t)/\partial t \text{ [В]}, \quad (1.1)$$

де  $\Phi(t)$  – миттєве значення магнітного потоку, Вб.

Під дією цієї ЕРС в металевому тілі навантаження виникає струм, частота якого збігається з частотою первинного струму.

Згідно із законом Ома в диференціальній формі, щільність струму в провіднику визначається добутком напруженості електричного поля  $E$  [В/м] і питомої електропровідності матеріалу  $\gamma_2$  [(Ом м)<sup>-1</sup>]:

$$\delta = \gamma_2 E. \quad (1.2)$$

Напрямок струму  $i_2(t)$  в навантаженні протилежний напрямку струму в індукторі  $i_1(t)$  (рис 1.1, б).

При протіканні електричного струму, індукованому в тілі металевого навантаження, виділяється теплова енергія, питому щільність якої  $P$  [Вт/м<sup>2</sup>] визначають відповідно до закону Джоуля-Ленца:

$$P = \delta^2 / \gamma_2. \quad (1.3)$$

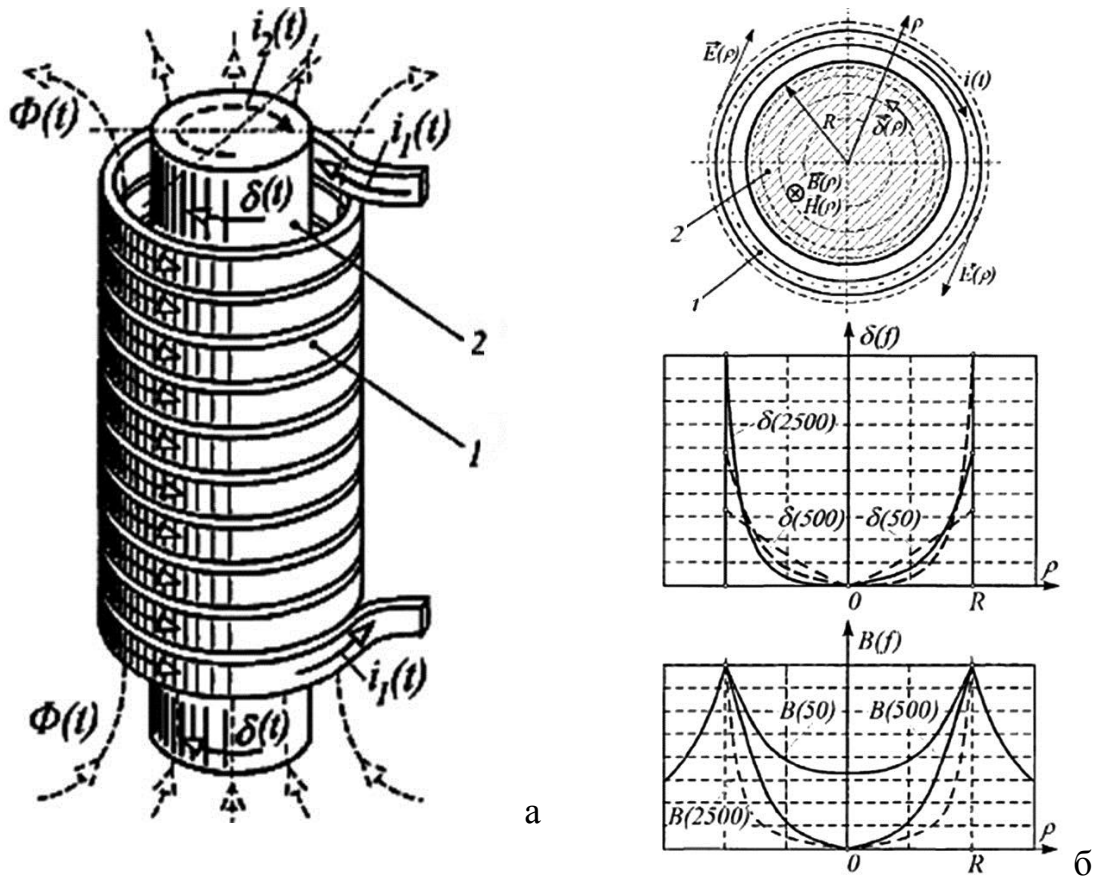


Рис. 1.1 Індуктор (1) з навантаженням (2): а – ізометрія, б – діаметральний перетин з графіками розподілу густини струму  $\delta$  та індукції магнітного поля  $B$  в перетині в залежності від частоти струму  $f$

Виділення теплової енергії призводить до підвищення температури навантаження. При незмінному струмі в індукторі, питома потужність і, відповідно, швидкість нагріву тим вища, чим більше частота струму [52-55]. Це пояснюється наявністю у завантаженні поверхневого електричного ефекту [51,52,58], який проявляється у нерівномірності розподілу густини струму тіла вздовж радіусу, яка спадає по експоненті до осі навантаження (рис. 1.1 б).

$$\delta_x = \delta_0 \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{\pi \mu_a \gamma / 2}}} = \delta_0 \cdot e^{-x/\Delta} \quad (1.4)$$

де  $\delta_0$  – густина струму на поверхні завантаження;  $\delta_x$  – густина струму на глибині  $x$  від поверхні завантаження;  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\Delta = \sqrt{2/\omega \mu \gamma}$  – товщина скін-шару в даному матеріалі на даній частоті струму,  $\text{м}$ ;  $f$  – частота струму,  $\text{Гц}$ ;  $\mu_a = \mu_0 \mu$  – абсолютна магнітна проникність,  $\text{Гн/м}$ ;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  – магнітна стала,  $\text{Гн/м}$ ;  $\mu$  – відносна магнітна проникність.

У скін-шарі товщиною  $\Delta$  виділяється 86% потужності (рис.1.2) і сконцентровано 63% щільності індукованого струму [58,59].

Існує також магнітний поверхневий ефект, коли внаслідок скін-ефекту магнітне поле не проникає в провідник з безкінечною електропровідністю, воно «виштовхується» з нього у випадку надпровідності [60,61].

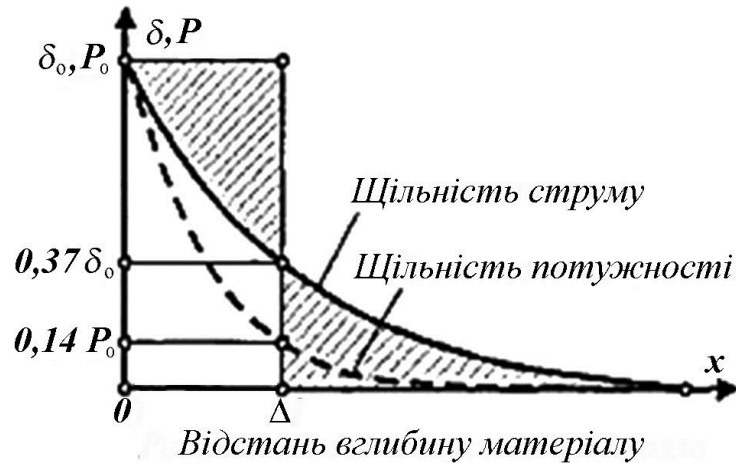


Рис.1.2 Розподіл щільності струму та потужності в провіднику при електромагнітній індукції

Знання закономірностей розподілу змінного струму по перетину електропровідних тіл дуже важливо при практичному використанні індукційної передачі електромагнітної потужності та моделюванні електромагнітних процесів. Так як при розрахунках і конструюванні установок необхідно враховувати фактичний розподіл струму в елементах приладів і, по можливості, керувати ним. Від цього в значній мірі залежать значення електричного коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності і інших параметрів приладу. А якщо врахувати, що індукційні установки досить енергоємні прилади, то стає зрозумілим, наскільки важливим в технічному, екологічному та економічному відношеннях є організація найбільш раціонального розподілу струму в елементах цих приладів.

### 1.3 Використання ВЧ концентраторів магнітного поля а наукових дослідженнях

Для отримання магнітних полів високої напруженості в наукових дослідженнях застосовують здебільшого концентратори трансформаторного типу.

Такі концентратори мають одновиткову вторинну "обмотку" циліндричної форми, яку охоплює первинна багатовиткова обмотка - індуктор. Магнітне поле такого концентратора утворюється струмами індуктора і струмами вторинної обмотки, і призначене для створення заданого струму у навантаженні або колімації заряджених часток. Особливості застосування концентраторів вимагають оптимізації їх конструкції відповідно до вимог джерел живлення і навантаження. Розглянемо найбільш типові конструкції концентраторів магнітного поля.

Вперше реалізували концентрацію магнітного поля Г. Бабат та М. Лозинський у 1940 р. [63]. Ними, також, була розглянута задача про розподіл магнітного потоку і вихрових струмів в області, що складається з провідників та ізоляторів. В дослідженні для вивчення розподілу поля використовували електролітичну ванну. Використовувалося те, що напруженість магнітного поля і вектор-потенціал підпорядковуються за межами електропровідного середовища рівнянню Лапласа. В результаті численних вдосконалень була створена "ідеальна" геометрія концентратора, основні принципи якої використовуються донині.

Розроблений концентратор зображений на рис. 1.3. Індуктор, навитий прямокутною мідною трубою, охоплений мідним кожухом. Всередині до кожуха приєднано мідний диск з радіальним розрізом і круглим отвором по середині. Вихрові струми сильно нагрівали диск, тому в цілях охолодження в ньому був зроблений канал в який подавалася вода. Потужність, яку розсіювала котушка, була більше 200 кВт.

Конструкція концентратора дозволяла перерозподілити густину електромагнітної енергії, тим самим частково зменшивши втрати на джоулеве тепло.

Індуктор живився від високочастотного генератора, який мав робочу напругу 10 кВ і під час нагрівання матеріалу відбувалась термоелектронна емісія між виробом і одновитковою котушкою, яка приводила до електричного пробою.

На рис. 1.4 зображено форму силових ліній багатовиткового індуктора з концентратором магнітного поля, отриману з допомогою електролітичної моделі. Г. Бабат і М. Лозинський ставили за мету насамперед концентрацію енергії в

малому об'ємі. Ю. Кім і Е. Платнер першими використали концентратор електромагнітного поля з метою отримання сильних імпульсних полів [64].

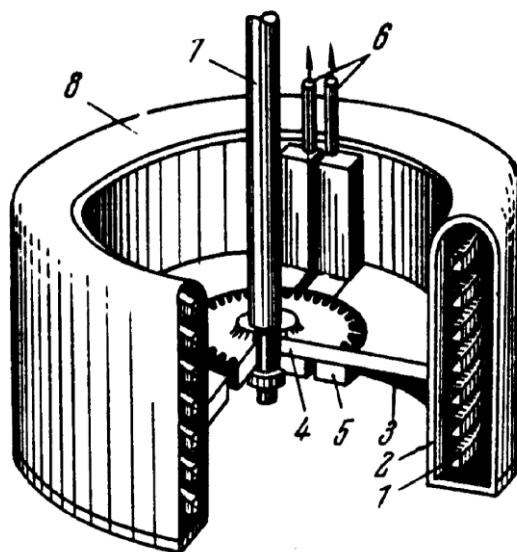


Рис. 1. 3 Концентратор магнітного поля Г. Бабата і М. Лозинського:

1 – обмотка індуктора з мідної трубки; 3 – мідний диск;  
4 – навантаження; 5, 6 – канали для руху охолоджуючої рідини; 7 – кріплення заготовки; 2, 8 – мідний кожух.

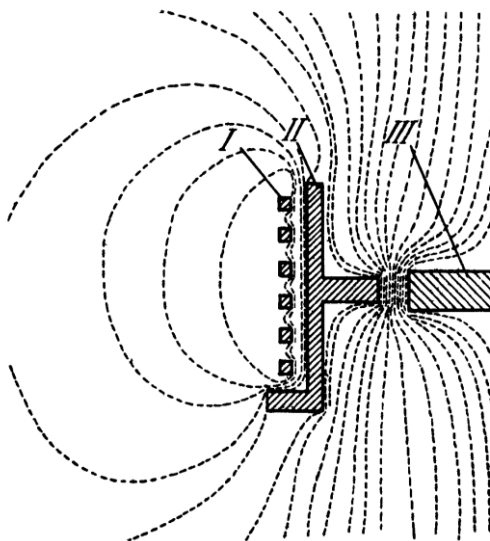


Рис. 1.4 Конфігурація магнітного поля у концентраторі Г. Бабата і М.

Лозинського: I – індуктор, II – концентратор, III – навантаження

Основним елементом конструкції їх концентратора був багатовитковий індуктор, всередину якого поміщався мідний циліндр, що мав осевий розріз і отвір. Під час зміни магнітного поля в індукторі у циліндрі генеруються вихрові струми.

Ці струми зовні циліндри мають протилежний напрямок до руху струму в індукторі, і той же напрямок на внутрішній поверхні циліндра. За рахунок цього магнітний потік створений індуктором концентрується в отворі циліндра, витісняючись з його об'єму. Використання концентратора дозволило збільшити напруженість магнітного поля в пристрої більше ніж в два з половиною рази.

Б. Хоуленд і С. Фонер досліджували концентратори і шукали конструкцію, яка б мала мінімальні втрати і максимальну ефективність [65,66]. На рис.1.5 наведено модель концентратора за результатами розрахунків енергетичних втрат в концентраторі з робочим об'ємом, який має форму гіперболоїда обертання. Основна частина втрат приходить на зовнішню поверхню концентратора  $C$  і внутрішню поверхню індуктора  $D$ . Втрати менші в повздовжній щілині  $B-B'$  і найменші в робочому об'ємі  $A$ .

Запропонована конструкція винятково міцна: наявність розсіяних полів в щілинах призводить до появи пондеромоторних сил, які намагаються збільшити ці щілини. Наприклад зовнішня поверхня концентратора і внутрішня поверхня індуктора відштовхуються.

Розсіяні поля і джоулеві втрати на зовнішній поверхні концентратора можна мінімізувати, проточивши на ній глибокий паз в вигляді спіралі і помістивши в цей паз обмотку соленоїда. При укладанні обмотки в паз тіло концентратора автоматично розвантажує обмотку від дії аксіальної пондеромоторної сили.

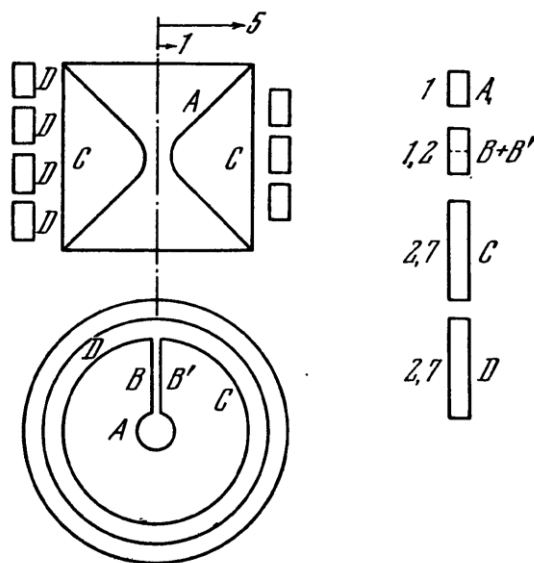


Рис. 1. 5 – Відносна величина омічних втрат в концентраторі за розрахунками Б. Хоуленда і С. Фонера. Цифри відповідають величині втрат (втрати в  $A$  прийняті за

1): А – внутрішня поверхня концентратора; В-В' – поздовжній розріз; С – зовнішня поверхня вкладиша; D – обмотка.

По розрахункам був виготовлений концентратор із латуні з внутрішнім діаметром 12 мм і зовнішнім діаметром 15 см [67]. На зовнішній поверхні концентратора в спіральний паз із 17 витків укладалась обмотка електропровідника. На обмотку надівався плексигласовий циліндр. Концентратор в зібраному вигляді показаний на рис.1.6. Ширина поздовжнього розрізу рівнялась 1 мм. Використовувались обмотки трьох типів: мідна шина, одягнена в панчоху з пластику, мідна стрічка в поліхлорвініловій ізоляції і стандартний мідний дріт. Дріт укладався по п'ять жил паралельно.

Обмотки витримували повне навантаження при розряді батареї конденсаторів ємністю 200 мкФ при напрузі 3 кВ. При розряді батареї ємністю 134 мкФ і напрузі 14 кВ обмотка виявила слабкі ознаки деформації в місці перетину з осевим розрізом в концентраторі.

Напруженість магнітного поля в концентраторі при тривалості імпульсу 230-300 мкс мало залежала від типу обмотки. В робочій порожнині концентратора було отримано поле напруженістю 270 кЕ. При цьому батарея конденсаторів ємністю 2000 мкФ заряджалась до 2,7 кВ.

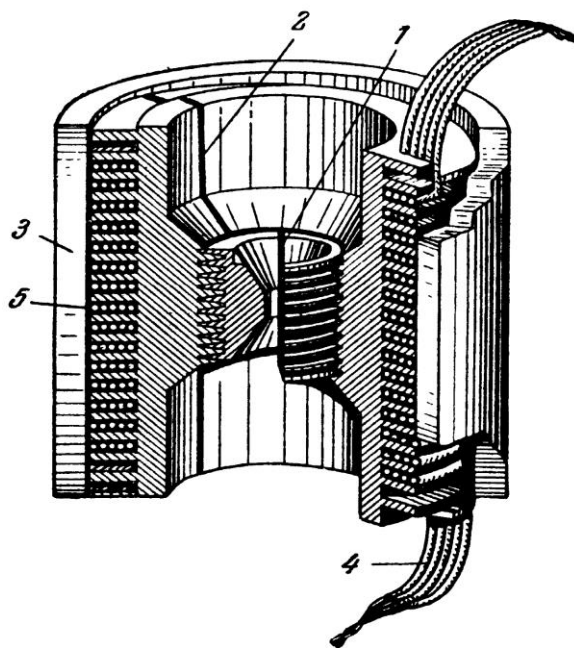


Рис. 1.6 – Двоступеневий концентратор Б. Хоуланда і С. Фонера. 1 – концентратор; 2 – розріз в концентраторі; 3 – захисний кожух; 4, 5 – обмотка

Для збільшення напруженості магнітного поля в латунний концентратор додатково запресовували мідний циліндр із внутрішнім діаметром 2 мм. При цьому амплітуда магнітного поля зросла до 450 кЕ, але мідь не витримала механічної напруги і внутрішній діаметр циліндра збільшився.

При розряді на обмотку індуктора батареї конденсаторів ємністю 134 мкФ при напрузі 14 кВ латунний концентратор без мідної вставки руйнувався, розтріскуючись по радіусу.

На рис. 1.7 зображено аксіальний розподіл поля в концентраторі у ході дослідження. Концентратор електромагнітної енергії з нерухомими стінками є дуже гнучким приладом. Завдяки можливості змінювати вставки і обмотку індуктора можна швидко міняти параметри поля, наприклад його геометрію. Також можна регулювати тривалість імпульсу, яка залежить від кількості витків у первинній обмотці. На первинній обмотці втрачається багато енергії, тому для зменшення цих втрат її охолоджують.

В [23,68, 69] запропоновано використовувати концентратор магнітного поля для утримання розплавленого металу в стані левітації. На рис 1.8 схематично показано конструкцію концентратора, який функціонує як трансформатор струму.

За рахунок левітації забезпечено процес безперервного лиття металевого стержня, що забезпечує подолання сил тертя, адгезії та гравітації, які зазвичай діють на литий стрижень в міру застигання з розплавленого стану. Для створення левітації колони розплавленого металу в електромагнітному полі використовується багатофункціональна котушка, підключена до багатофазного джерела електричної енергії.

Використання концентратора дозволяє покращити однорідність відлитих стержнів, спростити конструкцію пристрою та покращити електротехнічних характеристики. На рис.1.9 порівняно розподіл напруженості магнітного поля на осі концентратора і на осі індуктора без концентратора (у відносних одиницях).



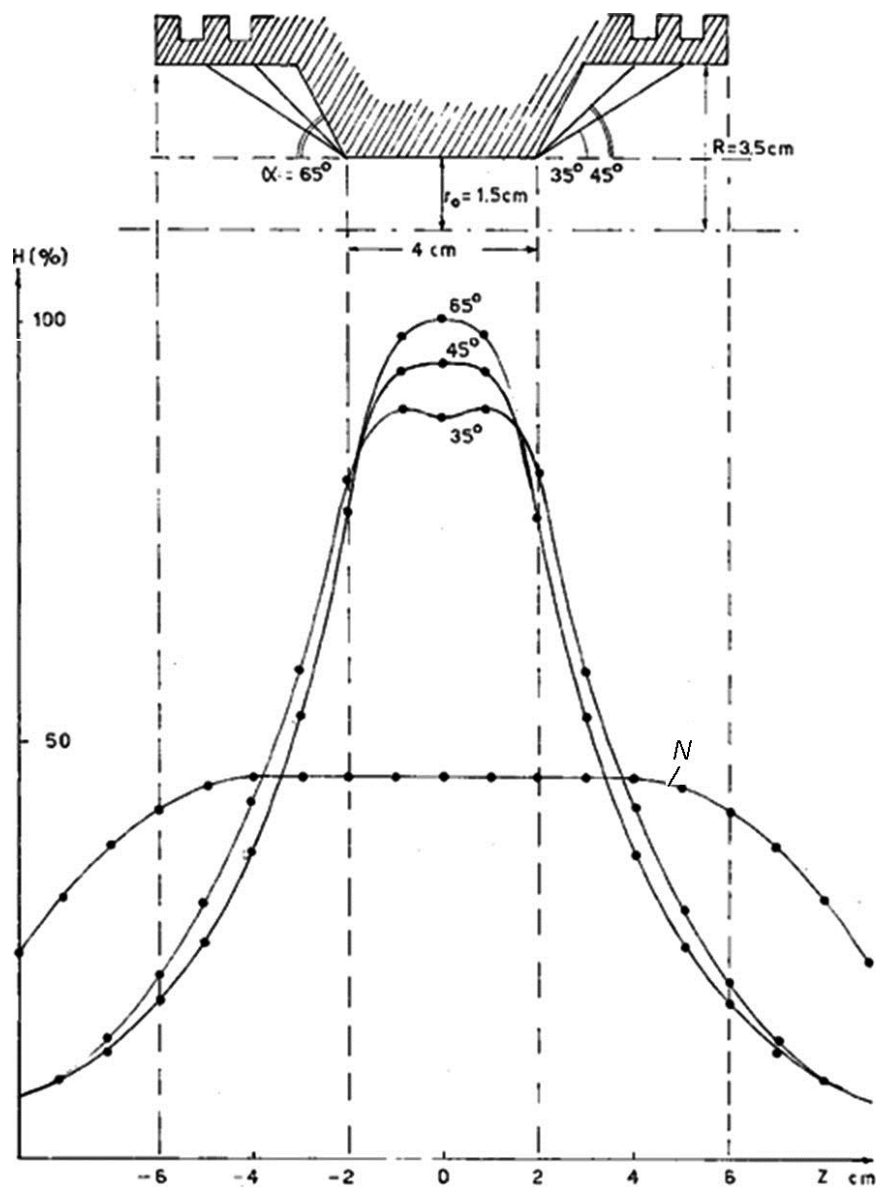


Рис. 1.7 Аксіальний розподіл магнітного поля в концентраторі  
(N – без концентратора)

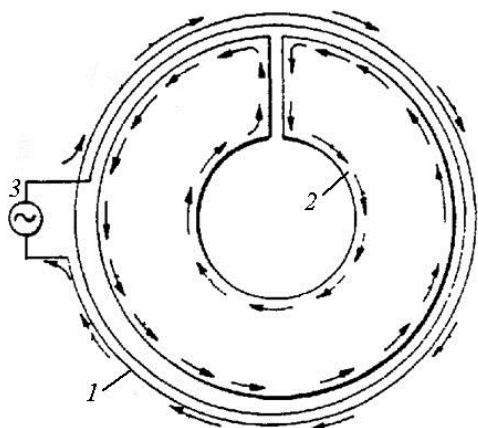


Рис.1. 8 Схема протікання струму в елементах концентратора В [68]:  
1 – індуктор, 2 – концентратор, 3 – джерело електричного струму

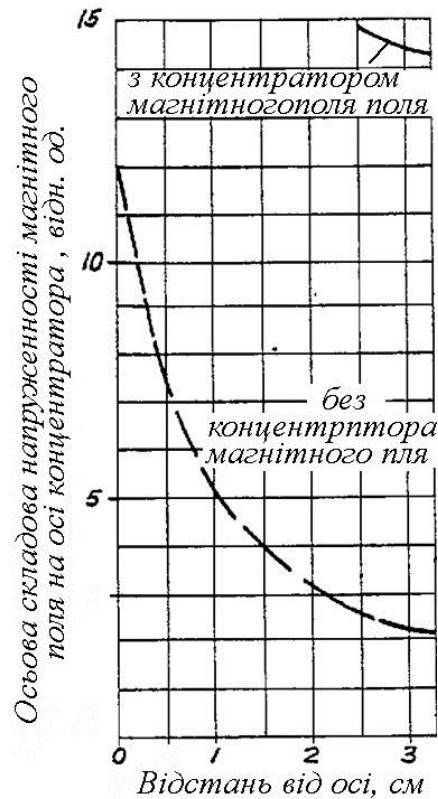


Рис. 1.9 Розподіл напруженості магнітного поля на осі концентратора і на осі індуктора без концентратора

В [70] запропоновано багат шарову котушка для створення інтенсивного магнітного поля змінного струму. Конструкція приладу наведена на рис.1.10. В круглих струмопровідних пластинах (1а, 1b, 1с) з радіальними прорізами (3а, 3b, 3с) по черзі укладені один на одну спірально намотані котушки (4а, 4b), які з'єднані послідовно і живляться змінним струмом порівняно низької частоти. Вихрові струми, які генеруються на периферії дисків 8, концентруються уздовж радіальних прорізів 9 і навколо центральних отворів пластин 10, що викликає концентрацію магнітного потоку в цих отворах. В результаті інтенсивне магнітне поле змінного струму може бути ефективно отримано за рахунок порівняно невеликого керуючого змінного струму в порівняно низькочастотному діапазоні. Спіральні котушки можуть бути утворені будь-якою кількістю обмоток з пластинами між ними для отримання змінного магнітного поля бажаної інтенсивності.

На рис.1.11 наведено розподіл силових ліній магнітного поля у багат шаровій котушці (сім шарів). Видно, що магнітне поле концентрується в просторі, який визначається отворами в пластинах.

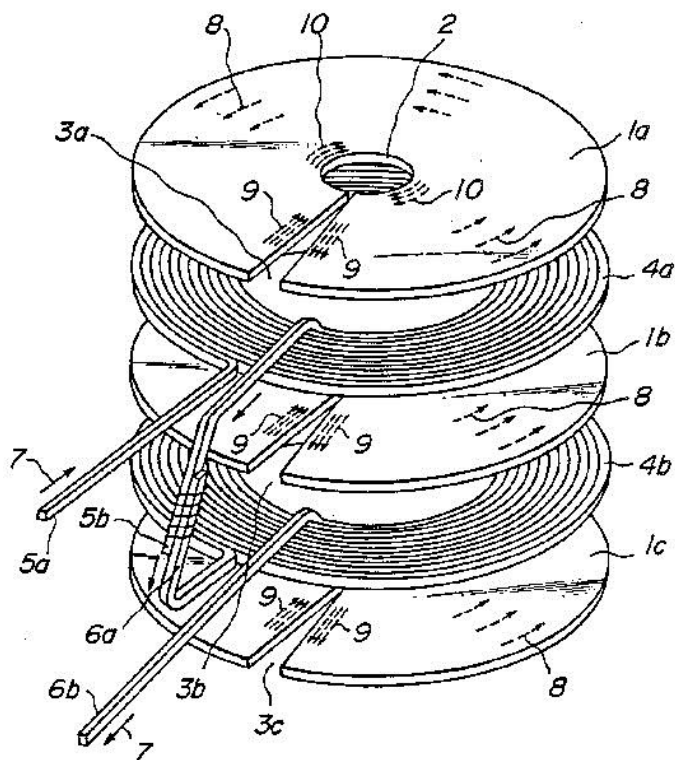


Рис. 1.10 Багатошарова котушка з концентрацією магнітного поля: 1 – електропровідні пластини; 2 – отвір для магнітного потоку; 3 – видалений сектор у пластині; 4 – багатовиткові плоскі котушки; 5 – вхід котушок; 6 – вихід котушок; 7 – напрям струму в котушках; 8 – напрям струму в пластинах; 9 – напрям струму вздовж прорізу; 10 – напрям струму навколо отвору в пластині

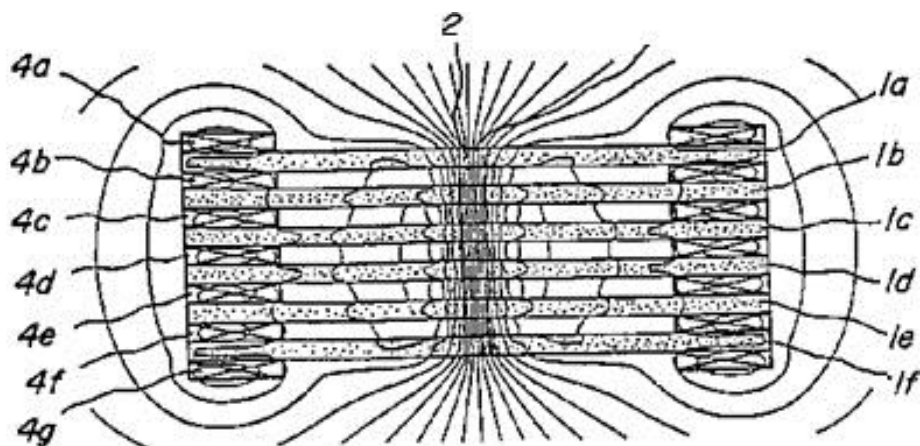


Рис. 1.11 Силлові лінії магнітного поля у багатошаровій котушці

Кінці кожної з котушок з'єднуються послідовно з іншими кінцями суміжних котушок, щоб сформувати безперервну котушку збудження вихрових струмів.

В [71] розглянуто використання концентратора магнітного потоку для колімації протонів. Концентратор створює магнітне поле з різким зростанням до пікового значення на відстані менш ніж 5 мм, а потім 10 см протони дрейфують до мішені. Концентратор являє собою мідну циліндричну котушку довжиною 10 см з зовнішнім радіусом 4 см з конусоподібною вставкою з внутрішнім радіусом, який зростає від 3,5 мм до 2,6 см (див. рис.1.12). Концентратор з зовнішніми ребрами для розділення витків індуктора був виготовлений шляхом механічної обробки з одного мідного блоку. Для водяного охолодження індуктор виготовлявся з прямокутної мідної труби (12 витків), яка була припаяна до затискачів, що з'єднувалися з провідниками від джерела струму.

Отримане імпульсне магнітне поле мало максимум напруженості 58 кГс при струмі 16 кА. На затискачах котушка мала індуктивність 0,8 мкГн. Форма струму мала напівсинусоїдальну форму тривалістю 5 мкс. Імпульси подавалися з частотою 120 Гц. Котушка мала один підтримуючий керамічний ізолятор на передньому кінці низької напруги. Концентратор потоку підвищив вихід позитронів приблизно в 2 рази і протягом декількох років працював стабільно.

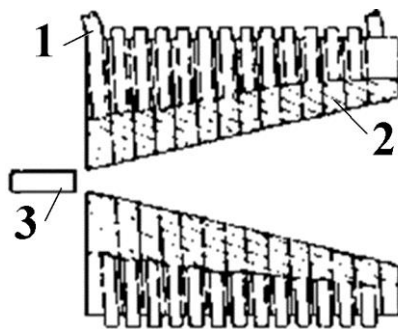


Рис.1.12 Концентратор для прискорення протонів:

1 – індуктор; 2 – концентратор; 3 – джерело протонів

Втрати ефективності для заданої кількості витків може бути обмежені зменшенням ширини зазору між витками. Оскільки на кожному зазорі знаходяться 2 глибини скін-шару, практична межа щілини становить приблизно 1 глибину скін-шару. У дослідного зразка глибина скін-шару становила 0,2 мм.

Ізолятором між витками слугував вакуум, що забезпечувало найкращу електричну ізоляцію між витками індуктора, який відпалювали перед використанням і очищали.

Розглянуті пристрої для отримання заданих значень напруженості магнітного поля використовують електромагнітний трансформатор особливої конструкції: багатовиткова первинна обмотка навантажена на одновиткову вторинну обмотку. До конструктивних особливостей слід віднести те, що вторинну обмотку виготовляють у вигляді монолітного мідного блоку, на зовнішню циліндричну поверхню якого кріпиться первинна обмотка.

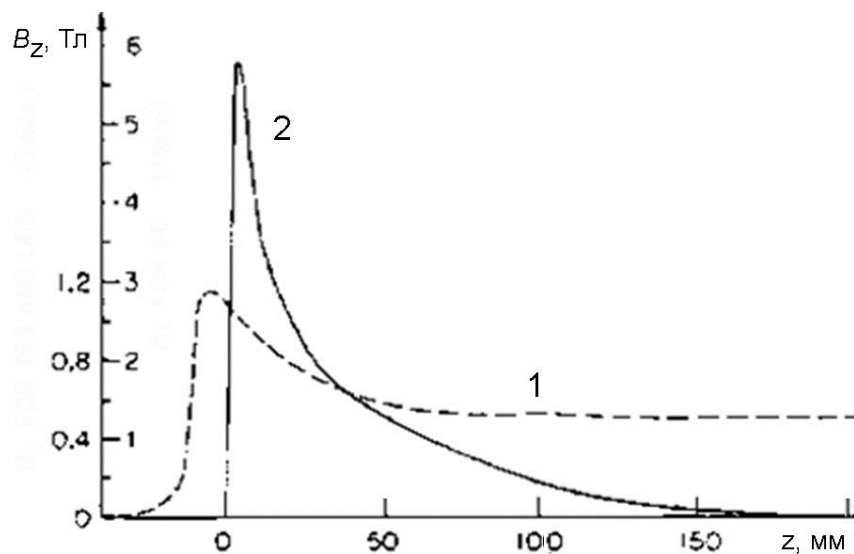


Рис.1.13 Розраховане (2,права шкала) та виміряне (1, ліва шкала) імпульсне магнітне поле концентратора [71]

#### 1.4 Прилади з ВЧ концентрацією магнітного поля технологічного призначення

Найпоширеніше застосування концентрації електромагнітного поля в промисловості – це індуктори для плавлення металів у металургії та закалювання деталей в машинобудівній галузі. Поширене також використання індукторів у вакуумі для плавлення та випаровування металів, і індукційного живлення розряду в паровому потоці.

Індукційний нагрів заснований на використанні декількох фізичних явищ: 1) електромагнітної індукції; 2) поверхневого ефекту; 3) ефекту близькості; 4) зміна властивостей речовин в процесі нагрівання.

Поверхневий ефект є основою індукційного нагріву, особливо при поверхневому загартуванні. Він виражається в нерівномірному розподілі струму по перетину провідника індуктора. При поверхневому ефекті найбільша щільність струму спостерігається в поверхні провідника, яка наближена до електропровідної поверхні [72,73].

Ефект близькості є різновидом поверхневого ефекту і полягає в концентрації струму в певних зонах поверхні провідників в результаті сумарної взаємодії електромагнітних полів всіх провідників зі струмом, що входять в досліджувану систему.

На рис.1.14 схематично показані картини магнітних полів двох провідників для випадку однаково спрямованих (рис.1.14,а, різниця фаз дорівнює нулю) і зустрічно спрямованих (рис.1.14,б, різниця фаз дорівнює  $180^\circ$ ) струмів. З рис.1.14 видно, що найбільша напруженість поля в системі з односпрямованими струмами спостерігається біля зовнішніх поверхонь провідників, а в системі з протилежно спрямованими струмами біля внутрішніх поверхонь. Основна частина електромагнітної енергії, яка поглинається провідником, надходить із зони сильного поля, там розташована і зона з найбільшою щільністю струму. Розподіл струму по глибині підпорядковується закономірностям поверхневого ефекту.

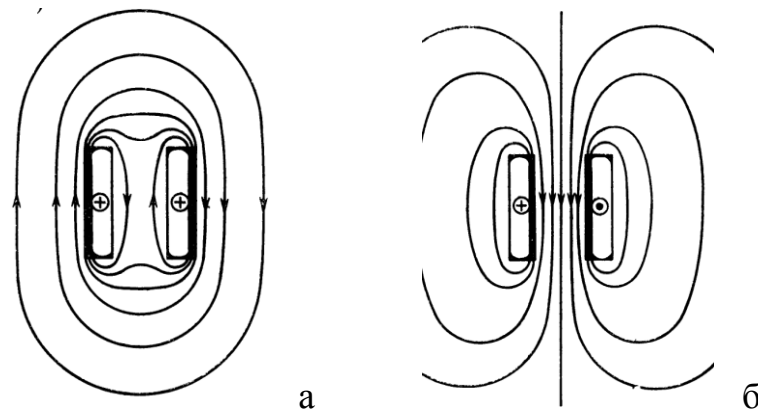


Рис. 1.15 Картина магнітного поля і розподілу струму при ефекті близькості:

а – однаково спрямовані струми, б – зустрічно спрямовані струми

Підбором форми індуктора можна концентрувати нагрівання в певних частинах поверхні оброблюваної деталі. Індуктор, виконаний у вигляді кільця, індукує в деталі, яку охоплює, струм також кільцевої форми. Струм концентрується в смузі, по ширині близькій до ширини індуктора.

Ефект близькості проявляється тим сильніше, чим менше відстань між провідниками і чим сильніше проявляється поверхневий ефект, тобто чим більше відношення товщини провідника до глибини проникнення струму.

Не слід змішувати перерозподіл струму в провіднику при ефекті близькості з електродинамічними взаємодіями між провідниками. Провідники з однаково спрямованими струмами притягуються один до одного, а з зустрічно спрямованими – відштовхуються.

#### 1.4.1 Індукційне плавлення та випаровування матеріалів

Безпосередньо до електроніки відноситься індукційне нагрівання, плавлення та випаровування матеріалів в технологіях отримання чистих матеріалів (зонне плавлення) та осадження тонких плівок у інтегральному виробництві мікросхем. Зазвичай ці процеси реалізуються у вакуумних камерах з детальним контролем складу залишкової атмосфери. Розглянемо приклади таких пристроїв.

Простіша конструкція індукційного випарника включає тигель, який охоплено індуктором [74-77]. Індуктор розміщують у вакуумній камері, або поза нею – навколо діелектричного відростка [78]. Тоді всередині відростка розміщують тигель з матеріалом, який випаровуються (рис.1.16). Над тиглем розміщується підкладка. На рис.1.16 платиновий тигель 1 з завантаженням речовини 2 утримується алюмінієвим кільцем 4, яке ізольоване від тигля слюдяним кільцем. Індуктор 3 живиться від ВЧ генератора. Тигель нагрівається до температури 1000°C. Температура тигля вимірюється термопарою 5. Паровий потік колімує діафрагма 6.

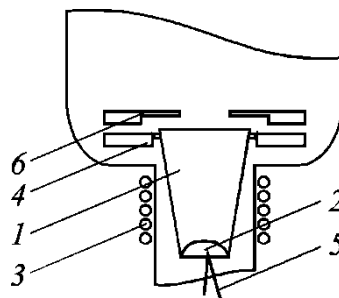


Рис. 1.16. Пристрій для випаровування речовин [78]: 1 - тигель, 2 - навішування, 3 - індуктор, 4 - тримач, 5 - термопара, 6 – діафрагма

В [79] запропоновано індукційний випарник з тиглем 1, що містить вставку 3 (рис.1.17). Індуктор 2 охоплює вставку 3 і живиться від ВЧ генератора потужністю близько 3 кВт. Утримувач підкладок 4 закріплений на осі і може обертатися. При випаровуванні утворюється потік пари в формі конуса, показаний зовнішніми штриховими лініями. Механізм 6 безперервно подає дріт для відновлення об'єму речовини завантаження, що випаровується. При подачі дроту механізмом 6 заслінка 5 перериває процес осадження.

Рекомендована глибина тиглів для випаровування в 2 рази більше за його діаметр. У міру випаровування завантаження потік пари звужується (внутрішні штрихові лінії).

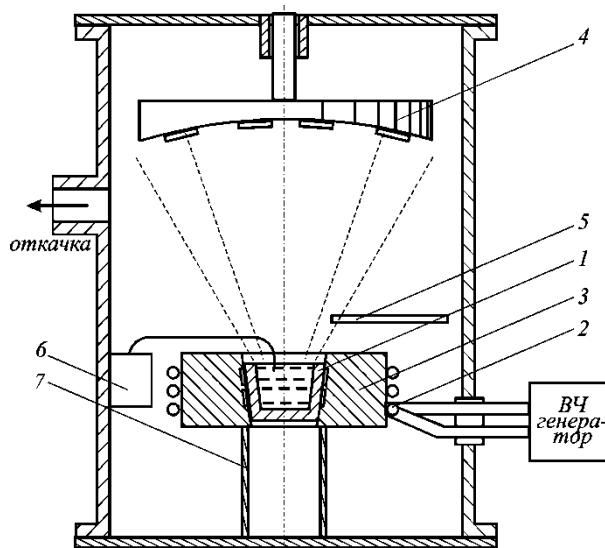


Рис.1.17 Пристрій осадження покриттів зі вставкою в випарнику [79]: 1 - тигель, 2 - індуктор, 3 - вставка, 4 – утримувач підкладки, 5 - заслінка, 6 - механізм подачі дроту, 7 - стійки

В [80] пропонується надавати тиглю форму, яка показана на рис.1.18. Тигель виготовлений з витонченим верхнього край, що призводить до інтенсивного нагріву алюмінію, змочувального край і його випаровуванню. Ефект посилюється при загостренні верхньої кромки тигля. Тигель виготовлений з керамічного матеріалу (50% - нітрид бору, 50% - диборид титану), стійкого до дії розплавленого алюмінію. Для робочої частоти 200 кГц розміри в міліметрах показані на рис.1.5, а. Якщо товщину стінок тигля в частині, де міститься розплав, взяти 1-2 мм, то під дією електромагнітного поля індуктора в рідкому металі виникнуть турбулентні



течії, здатні привести до викиду крапель алюмінію. Для придушення турбулентності товщину стінок тигля вибирають більше скін-шару.

Описаний випарник дозволяв багаторазово випаровувати алюміній без розбризкування і виходу з ладу індуктора при швидкості осадження плівки 0,5 - 5 нм / с і відстані до підкладки 13 - 85 см.

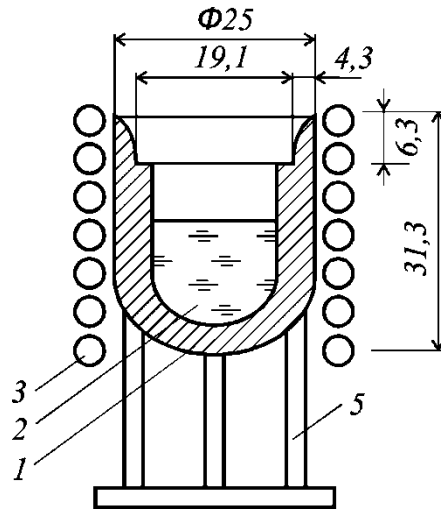


Рис. 1.18. Індукційний випарник:

(1 - тигель; 2 - розплав алюмінію; 3 - індуктор; 4 - теплові екрани; 5 - керамічні стійки)

Пристрій безгазового вакуумного осадження тонких плівок з іонізацією парового потоку показаний на рис.1.19 [81]. Він містить матеріал 1, який випаровується, що подається у вигляді дроту в чашоподібний тигель 2. Матеріал 1 нагрівається за допомогою індуктора 3 і концентратора 4. До воронкоподібного електроду 5 прикладається позитивний потенціал щодо дроту 1 для створення розряду в парах матеріалу дроту. Подача дроту здійснюється за допомогою штовхача 6. Індуктор 3 і концентратор 4 охолоджується водою. Підкладка розміщується над тиглем і піддається впливу потоку іонізованої пари матеріалу дроту.

Для іонізації пари при низькому її тиску в пристрій вводять джерело електронів у вигляді катода. Подібний пристрій було використано для отримання епітаксійних плівок кремнію [82], який показано на рис.1.20. У пристрої використовувався метод автоматичного випаровування кремнієвого злитка 1. Його нагрів здійснювався індуктором 2. Пара кремнію іонізована в розряді,

створюваному між розжареним катодом 3 і анодом 6. На анод подавався позитивний потенціал 300 В. На підкладку 4 за допомогою утримувача підкладок 5 подавалася негативна напруга до 3 кВ.

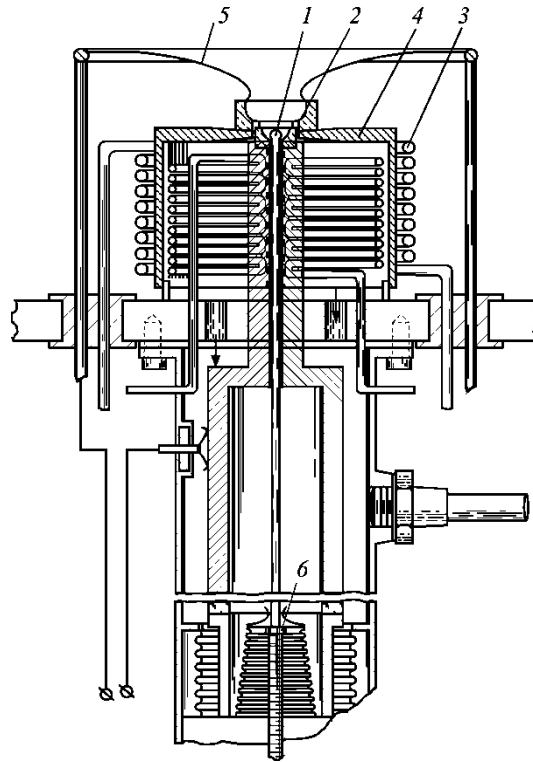


Рис. 1.19 Плазмоіонний генератор з індукційним нагріванням [81]:

1 - завантаження; 2 - тигель; 3 - індуктор; 4 - концентратор; 5 - електрод; 6 -

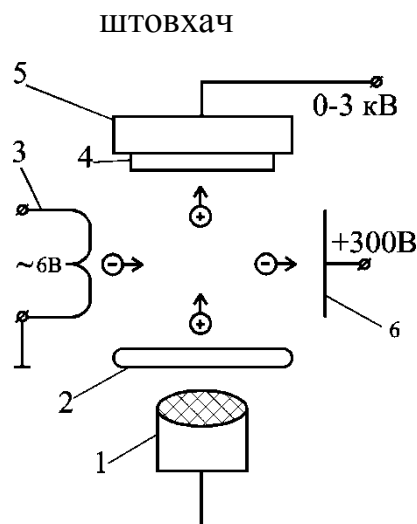


Рис.1.20 Пристрій для епітаксії кремнію [82]: 1 - кремній; 2 - індуктор; 3 - катод; 4 - підкладка; 5 - підложкодержатель; 6 - анод

Злиток кремнію був легований цинком або кобальтом. Завдяки іонізації пари вдалося підвищити на порядок концентрацію Zn і Co в епітаксійних плівках кремнію в порівнянні з не стимульованим "захопленням" домішки [83].

Енергію ВЧ індуктора можна використовувати, і для випаровування матеріалу, і для іонізації пари. Використання для цієї мети одношарових неекраниваних індукторів, таких, як показано на рис.1.18, зазвичай призводить до виникнення електричної дуги і закорочування індуктора. Заземлення верхнього витка [84] і зниження частоти струму в індукторі [77] не завжди буває достатньо для запобігання електричної дуги, тому доцільно індуктор екранувати.

Запропоновано розділяти функції випарника і іонізатора шляхом переходу до системи з двома індукторами [85], як це показано на рис.1.21. У робочій камері 1, встановленій на базовій плиті 2, створюється вакуум через канал 3. Інертний газ подається через натікач 4. Матеріал 7, випаровується з тигля 5 за рахунок нагрівання індуктором 6, і проходить через плазму ВЧ розряду Н типу, яка створюється індукційним іонізатором 8 в інертному газі. Іони газу, атоми і іони пари осідають на підкладці 9, встановленій на утримувачі підкладок 10, на якому негативний щодо корпусу потенціал, який задається резистором 11. Індуктори для випаровування і іонізації охолоджуються водою і можуть з'єднуватися послідовно (рис.1.21,а) з одним джерелом живлення - ВЧ генератором 12. Частота живлення і кількість витків індукторів в цьому випадку підбираються для забезпечення ефективного випаровування і іонізації. Однак, можливість роздільного управління режимами роботи пристрою в такій конструкції обмежена.

На рис.1.21, б наведено варіант аналогічного індукційного випарника, в якому ВЧ генератор має два виходи, що дозволяють здійснювати незалежне управління ВЧ потужністю, що прикладається окремо до індукційного іонізатору. Продуктивність процесу збільшується в пристрої рис.1.21, б, коли контур іонізації налаштований на частоти для ефективної іонізації газу і пари (десятки МГц), а контур індукційного випарника на більш низькі частоти (десятки - сотні кГц). Подібні пристрої застосовуються і для реактивного осадження покриттів, коли в якості баластного газу використовується суміш інертного і реактивного газів.

#### 1.4.2 Індукційне нагрівання деталей

Нагрівання плоских і внутрішніх циліндричних поверхонь значно складніше, ніж нагрівання будь-яких зовнішніх замкнутих поверхонь [86]. При нагріванні

зовнішніх поверхонь (рис.1.21) об'єкт, який поміщений усередині індуктора, нагрівається в зоні сильного магнітного поля, а шлях зворотного замикання магнітного потоку знаходиться поза індуктором, в зоні з відносно малою напруженістю магнітного поля. Складова струму індуктора, що створює магніторушійних силу для подолання магнітним потоком магнітного опору цієї ділянки, відносно мала. Повний струм індуктора порівняно мало перевершує струм, який індукується в об'єкті, що нагрівається.

Кільцевий ефект і ефект близькості, які діють погоджено, сприяють концентрації індукваного струму у вузькій зоні, ширина якої слабо залежить від зазору і близька до ширини індуктора. Активний опір об'єкта, який нагрівається, завдяки цьому відносно великий.

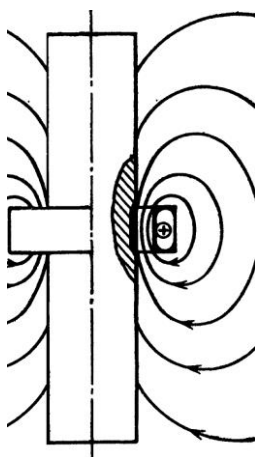


Рис. 1.21 Магнітне поле індуктора з деталлю всередині

Навпаки, при нагріванні поверхні всередині отвору (рис.1.22 і рис.1.23,а) магнітний потік індуктора замикається в зоні сильного магнітного поля всередині індуктора, внаслідок чого магнітний опір зворотного замикання великий, і відносно велика складова струму індуктора, що створює магніторушійних силу для подолання магнітним потоком магнітного опору. Тому струм індуктора для нагріву внутрішньої поверхні більше струму індуктора для нагріву зовнішньої при однакових розмірах обох індукторів. Різниця зростає зі зменшенням діаметра індуктора і з пониженням частоти. Очевидно, що наслідком цього є відносне збільшення втрат в індукторі і зниження його ККД.

Власний активний опір індуктора для нагріву зовнішніх поверхонь дещо більший опору індуктора для нагріву внутрішніх поверхонь, як наслідок

протилежної дії кільцевого ефекту і ефекту близькості, коли перетин дроту використовується краще. Однак це не компенсує розглянутих недоліків, наслідків кільцевого ефекту. Для того щоб такі індуктори мали досить високий електричний ККД, необхідно застосовувати зазори не більше 2-3 мм, а при діаметрах індуктора менших 50 мм, зазор повинен складати близько 1 мм.

Для нагріву отворів діаметром, менших 100 мм, за допомогою простих індукторів слід використовувати радіочастоти, які забезпечують кращий магнітний зв'язок індуктора і деталі, яка нагрівається, а отже, і більш високий ККД індуктора.

При відсутності об'єкта, який нагрівається, майже весь струм сконцентрований на внутрішній поверхні індуктора в шарі, товщина якого приблизно дорівнює глибині проникнення струму. Якщо помістити індуктор всередину отвору деталі, яка нагрівається то, за рахунок ефекту близькості, струм буде проходити і по зовнішній поверхні індуктора. В перетині індуктора встановиться деякий розподіл струму (див. рис.1.23). При цьому струм концентрується на зовнішній поверхні індуктора тим сильніше, чим менше зазор, внаслідок дії ефекту близькості. Також зростає напруженість магнітного поля біля поверхні деталі і індукувати в ній струм. Розподіл струму по поверхні деталі і ширина активного шару наближено визначаються по ефективному зазору, який дорівнює відстані від центра ваги епюри струму в індукторі до поверхні, яка нагрівається. Ефективний зазор збільшується зі збільшенням радіальної висоти дроту індуктора.

Радіальну висоту дроту індуктора по можливості зменшують також і тому, що при цьому буде зменшуватися магнітний опір, який в значній мірі визначається площею поперечного перерізу внутрішньої порожнини індуктора. Однак вибір обмежено умовами охолодження індуктора і його механічною міцністю. Мінімальна висота проводу практично становить 6-8 мм.

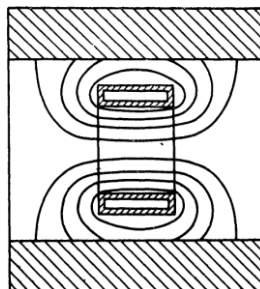


Рис. 1.22 Магнітне поле індуктора у випадку нагріву внутрішньої поверхні

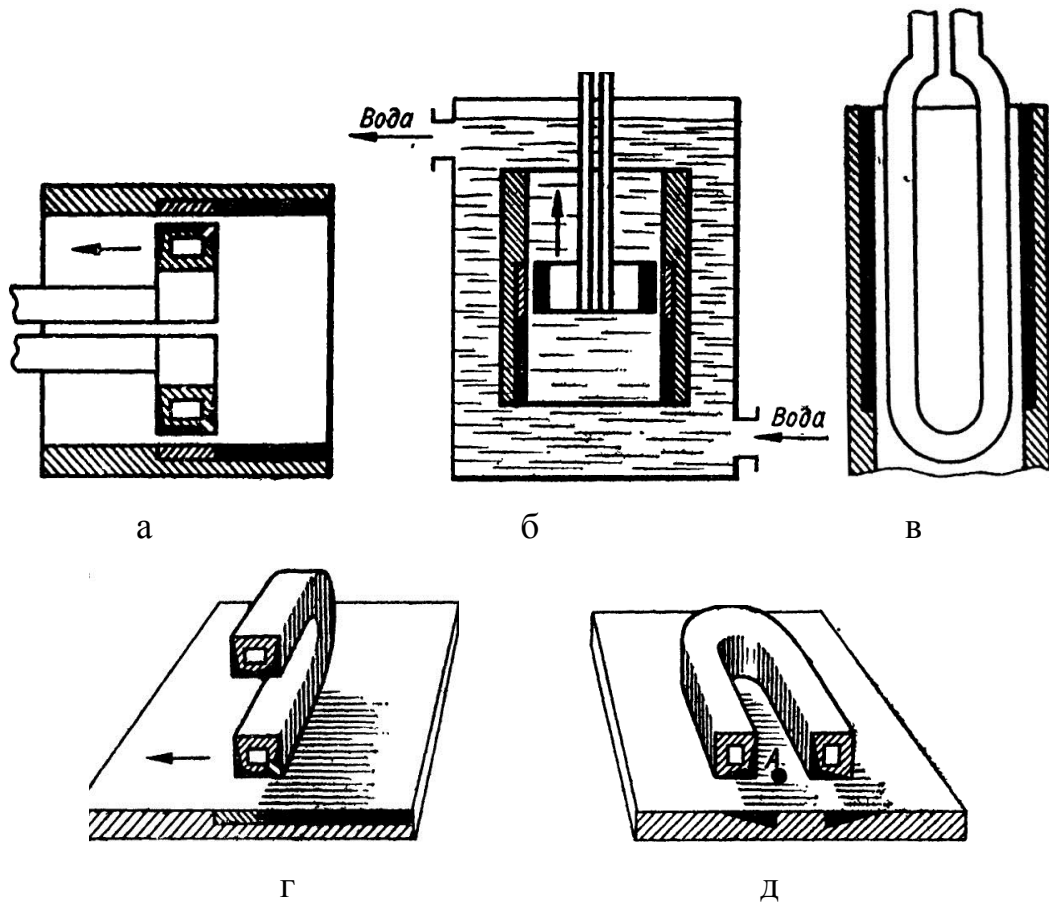


Рис. 1.23 Використання індукторів без магнітопроводів: а – циліндричний з мідної трубки для загартування внутрішньої поверхні; б – те ж, з тонкої стрічки для загартування під водою; в – індуктор у вигляді петлі для загартування внутрішньої поверхні; г - індуктор для гарту плоскої поверхні з вертикальним розташуванням проводів; д – те ж, з розташуванням проводів в горизонтальній площині [86]

При діаметрах, більших за 100 мм, можуть використовуватися частоти 2500-8000 Гц. У всіх випадках, однак, електричний ККД виявляється трохи нижче, ніж у відповідних індукторів для загартування зовнішніх поверхонь. При малих діаметрах отвору (менше 30 мм) індуктор звичайної конструкції має ККД приблизно 20-30%, що практично виключає можливість його використання. В цьому випадку можна застосувати метод гартування під водою, коли індуктор з тонкого суцільного дроту або стрічки (рис.1.23,б), разом з деталлю занурюється в воду, яка охолоджує індуктор [87]. Втрати тепла деталей не занадто великі, так як поблизу нагрітої поверхні утворюється парова сорочка. При такій конструкції індуктора значно послаблюється кільцевий ефект і зменшується магнітний опір на ділянці всередині індуктора, внаслідок збільшення площі отвору.

Часто для загартування отворів застосовують індуктори петлевого типу (рис.1.23, в), які нагрівають дві смуги з протилежних сторін отвору. Для рівномірного нагрівання всієї поверхні деталь приводиться в швидке обертання. У цьому випадку також справедливо все сказане про роботу циліндричних індукторів.

У індукторі на рис.1.23, г провідники індуктора розташовані у вертикальній площині і тільки нижній є робочим. Тому збільшення відстані між проводами призводить до зростання втрат в шинах підводу електроенергії і до різкого зниження коефіцієнта потужності. ККД у індукторів обох типів досить низькі і зазвичай складають 40-60%.

Якщо на дріт індуктора надіти магнітопровід, то концентрація струму під індуктором різко підвищується. Це відбувається за рахунок зменшення магнітного опору зворотного замикання. Також зменшення впливу зворотного проводу індуктора на розподіл індукovanого струму може бути досягнуто застосуванням магнітопроводу, виготовленого із листів трансформаторної сталі або з феритів. На рис.1.24 наведено ескіз магнітного поля і поперечного розрізу індуктора.

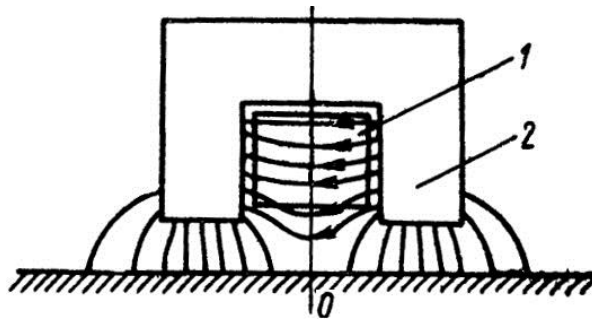


Рис.1.24 Концентрація магнітного поля дроту індуктора з магнітопроводом:

1 – дріт, 2 - магнітопровід

Індукція в магнітопроводі зазвичай дорівнює  $0,15 \div 0,8$  Тл. Тому його магнітним опором можна знехтувати і вважати, що він визначається лише довжиною повітряних проміжків, ( $2 \div 5$  мм) між черевиками магнітопроводу і нагрівається поверхнею. За допомогою магнітопроводу можна також змінити розподіл індукovanого струму на поверхні деталі. При ширині індуктора менше полуторного зазору, подальше його звуження майже перестає впливати на розподіл індукovanого струму по поверхні, що знижує загальний ККД нагріву.

По ширині паза в магнітопроводі поверхнева щільність струму змінюється відносно мало і швидко падає за його межами; із зовнішнього боку це проявляється в різко окресленій формі нагрітої смуги. Можливість впливу на розподіл індукованого струму використовується в ряді випадків для вирівнювання нагріву при загартуванні.

### 1.5 Висновки по розділу

На основі аналізу літературних джерел щодо застосування ВЧ концентрації електромагнітного поля в приладах та пристроях для зміни агрегатного стану речовин та зарядового стану парових потоків можна зробити наступні висновки:

1. Оскільки ВЧ концентрацією електромагнітного поля за допомогою індукторів можливо реалізувати у будь-якій речовині і в будь-якому агрегатному стані, цей метод можна вважати одним з найбільш універсальних щодо фізичного впливу на речовини. Особливо важливо, що індукційні прилади та пристрої з ВЧ концентрацію електромагнітного поля ефективні і надійні, широко використовуються для нагрівання, плавлення, випаровування речовин та іонізації парових потоків. Можливо реалізувати випаровування речовин в рідкому, дисперсійному та і твердотільному стані. Ефективність концентрації ВЧ електричної енергії в теплову енергію визначається конструкцією концентратора і розмірами поглинача енергії (деталі, тигля, завантаження), і його електрофізичними параметрами.

2. Систематичні теоретичні дані про енергетичні характеристики приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля відсутні, не розглянуто вплив на них конструктивних параметрів реальних приладів. Відсутні критерії оцінки ефективності таких приладів, систематизація приладів і параметрів що характеризують їх роботу. Більшість дослідних робіт виконано для вирішення окремих (приватних) технічних задач, і їх досвід не узагальнений.

3. Однією з головних задач мікро- та наноелектроніки є вакуумне випаровування речовин з подальшою іонізацією пари, яке широко застосовується



для металізації мікросхем і створення мікро- і нанодисперсних конденсатів (порошків).

4. Застосування в індукційних приладах ВЧ концентрації електромагнітного поля додаткових елементів дозволяє підвищити значення магнітного потоку, розширити діапазон експлуатаційних параметрів та діапазон керування параметрами технологічних процесів.

5. Використання індукційних ВЧ приладів трансформаторного типу з метою концентрації електромагнітного поля дозволяє створювати потужне магнітне поле з заданою конфігурацією.

6. Унікальною перевагою приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля є безпека їх застосування при пожежо- та вибухонебезпечних процесах, в процесах з хімічно активними середовищами, випаровуванні в газовому середовищі, для левітаційного випаровування металів, відсутність радіаційного впливу на оточення.

7. Теорія концентрації електромагнітного поля достатньо розвинена, і моделюванню таких процесів присвячена велика кількість робіт. Існуючі моделі вивчають динаміку нагріву під гартування, прискорення заряджених елементарних частинок і вивчають ефективність використання обладнання. Відомі дослідження моделей приладів з концентрацією електромагнітного поля розраховані на температури, які не враховують параметрів процесу випаровування. Відсутні моделі, що зв'язують електричні параметри приладів з геометричними розмірами його компонентів. Встановлено, що фізико-топологічне моделювання приладів з ієрархією пов'язаних процесів перетворення енергії від енергії, яка поглинається індуктором до енергії частинок парового потоку не проводився ні для одного типу конструкції.

## РОЗДІЛ 2

### ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЛАДІВ З ВЧ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

#### 2.1 Місце фізико-топологічних моделей у фізичному та математичному дослідженні

Фізико-топологічні моделі є одним з типів математичних моделей, які, в наслідок розвитку чисельних методів розрахунку, набули можливість деталізованого аналізу пов'язаних фізичних процесів у приладах, з урахуванням впливу на них конструктивних параметрів [88-90]. Використання спеціалізованих потужних комп'ютерних станцій та програм фізичного моделювання дозволяє оптимізувати конструкцію приладу будь якої складності на сонові деталізованого ієрархічного аналізу параметрів фізичних процесів у цьому приладі і оточуючому середовищі [91,92]. Розвиток чисельних методів розрахунку на сьогодні дозволяє проводити дослідження тривимірних моделей приладів з розмірами реального приладу.

Фізико-топологічне моделювання, як головний етап проектування приладів, займається розрахунком і оптимізацією електричних характеристик і електрофізичних параметрів широкої номенклатури елементів заданої конструкції при заданих або розрахованих в моделі топографії і розподілах фізичних характеристик.

При фізико-топологічному моделюванні вихідними даними слугують конструкція приладу та його компонентів, умови його функціонування і складаються з: табличних, аналітичних або алгоритмічних описів профілів властивості компонентів приладу. Основними вихідними даними є геометричні розміри компонентів, топологія приладу (розміри, орієнтація і прив'язка конструкційних компонентів до оточуючих середовищ), фізичні характеристик компонентів приладу (наприклад, емітера, катода, бази, колектора, аноду, тощо).

В процесі розрахунків і дослідження вихідні дані фізико-топологічного моделювання редагуються на основі проміжних (ітераційних) результатів – кривих

і параметрів збіжності, інтегральних оцінок точності, статичних і динамічних характеристик досліджуваного приладу, фрагмента або структури, параметрів еквівалентних електричних або апроксимаційних математичних моделей елементів.

Фізико-топологічне моделювання є ключовим етапом автоматизованого проектування приладів. Після ескізного етапу, оцінці значення технічної новизни приладу, розрахунку елементів і їх характеристик виконуються фізико-топологічного моделювання приладу, розрахунок параметрів процесів, оптимізація конструкції і аналіз результатів.

З початку свого виникнення, фізико-топологічне моделювання значно розвилось: набуло можливості достовірного та візуалізованого тривимірного аналізу фізичних процесів, стало універсальним засобом при конструюванні приладів у всіх галузях фізики та хімії. На цьому тлі наочно постали декілька задач фізико-топологічного моделювання:

1. Розробка алгоритму комплексного розрахунку адекватного пов'язаним процесам у приладі;
2. Використання адекватних математичних моделей фізичних процесів;
3. Визначення початкових та граничних умов розрахунку пов'язаних фізичних задач.

Розглянемо ці задачі.

### 2.1.1 Алгоритми розрахунку фізико-топологічних моделей

Алгоритм фізико-топологічної моделі будується на основі ієрархії процесів у приладі і впливу параметрів елементів приладу на ці процеси. Алгоритм включає:

- параметри приладу які визначають його робочі характеристики: здебільшого, це геометричні розміри та фізичні властивості функціональних елементів, наприклад, діаметр та струм емісії катоду, відстань між електродами та тиск робочого газу, тощо;
- послідовність розрахунків математичних моделей;
- зв'язок між результатом розрахунку первинного процесу і початковими умовами наступного процесу;

- критерій оцінки результату розрахунків;
- параметри зворотного зв'язку розрахунку – вектор зміни початкових умов фізико-топологічної моделі

Для описання ієрархії процесів у фізико-топологічних моделях можна використовувати графічні схеми алгоритмів програмування, які відображають введення і вивід даних, введення початкових та граничних умов, процеси та зворотні зв'язки від результату до початкових та граничних умов. На рис.2.1 наведено схема алгоритму комп'ютерного дослідження параметрів індукційного випарника у якості прикладу [93].

Розробка алгоритму фізико-топологічної моделі є найбільш складною комплексною задачею, яка вимагає ідентифікації всіх фізичних процесів у приладі та зв'язку між ними, встановлення впливу конструктивних параметрів на ієрархію процесів, визначення критеріїв задовільних результатів розрахунків та погодження метрики процесів.

Відносно електронних приладів та пристроїв головні процеси – це протікання електричного струму в компонентах приладів та магнітна індукція в оточенні компонентів. Як наслідок протікання струму досліджується температурне поле з урахуванням всіх теплових втрат і визначаються теплові режими роботи приладів.

Ідентифікація параметрів моделей проводиться за принципом відтворення зовнішніх електричних характеристик модельованого елемента, отриманих на етапі фізико-топологічного проектування або в результаті вимірювання тестових зразків приладів.

### 2.1.2 Математичні моделі фізичних процесів

У табл.2.1 наведено класифікацію основних типів математичних моделей. За зв'язком математичних моделей з фізикою роботи приладу їх можна поділити на формальні експериментально-статистичні і фізико-математичні.

Експериментально-статистичні моделі – це результат статистичної обробки експериментальних даних, вони представляють собою апроксимацію характеристик приладу і не відображають фізичних процесів в ньому. Вони розглядають прилад у вигляді багатополюсника – «чорного ящика».

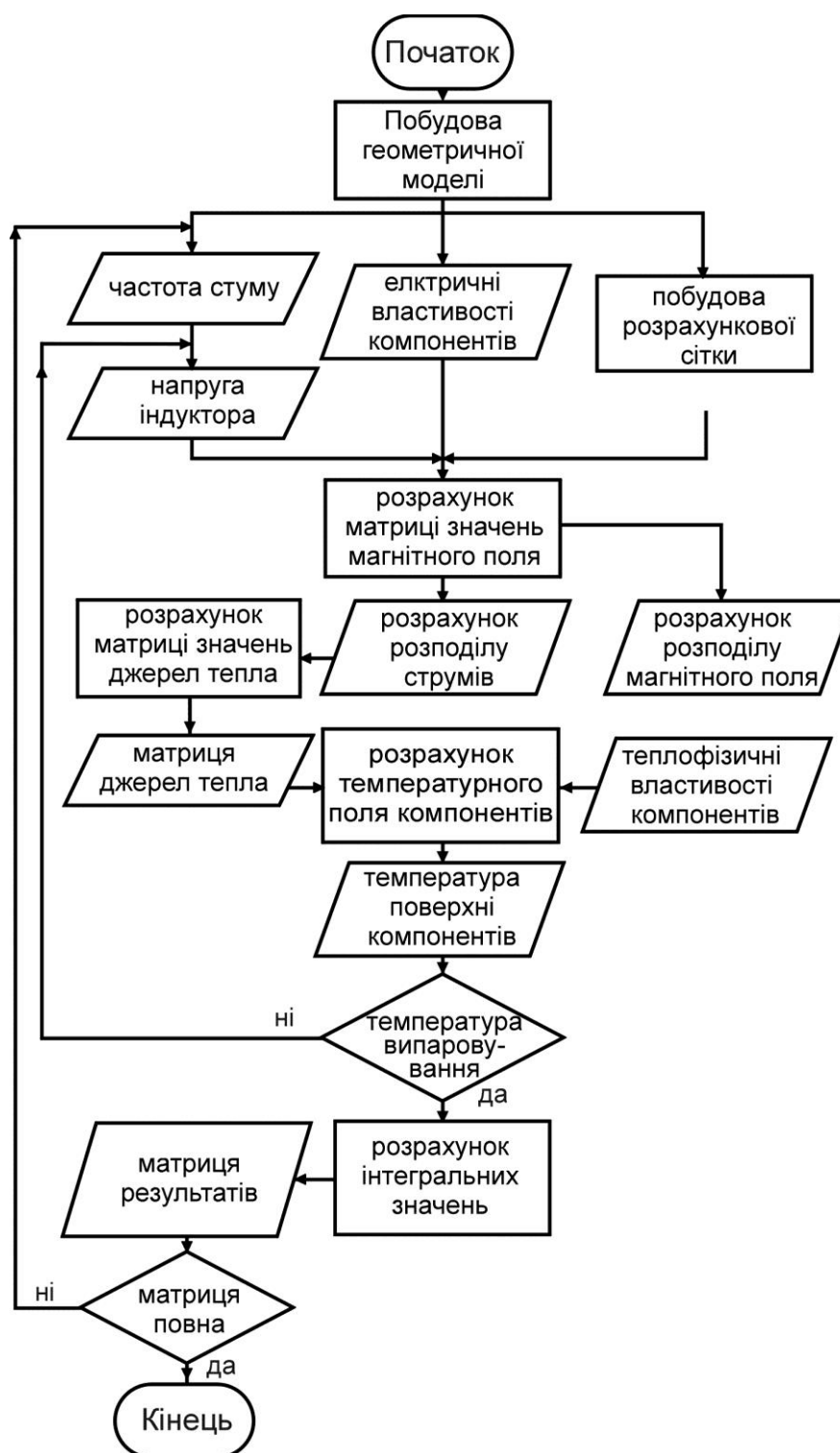


Рис.2.1 Схема алгоритму розрахунку параметрів індукційного випарника

[93]

Взагалі, математична модель – це сукупність пов’язаних аргументами, функціями або параметрами математичних співвідношень. Якщо ці аргументи, функції або параметри характеризують фізичні процеси в середовища, то такі системи математичних рівнянь називають фізико-математичною моделлю. Фізико-математичні моделі є результатом теоретичного дослідження приладу і окрім системи рівнянь, яка описує фізичні процеси, включає рішення рівнянь і аналіз отриманих результатів.

Спосіб розв’язання системи рівнянь фізико-математичні моделі може бути аналітичними або чисельними. Тому і фізико-математичні моделі поділяють на аналітичні або чисельні.

Таблиця 2.1 Класифікація математичних моделей

Класифікаційна ознака	Математичні моделі електронних приладів		
Зв’язок з фізикою роботи приладу	Експериментально-статистичні	Фізико-математичні-етичні	
Набір вихідних параметрів	Фізико-топологічні	електричні	технологічні
Число координат	одномірні	двомірні	тривимірні
Метод рішення системи рівнянь	аналітичні	чисельні	
Режим роботи приладу	Для великого сигналу	Для малого сигналу	
	Статичні / Динамічні		

Рішення аналітичних фізико-математичних моделей представляють собою математичне співвідношення у вигляді аналітичної залежності вихідних параметрів приладу від властивостей та стану його компонент і зовнішніх впливів. Аналітичне рішення диференційних рівнянь можливе лише при суттєвих спрощеннях рівнянь і введенні ідеалізованих припущень. Рішення рівнянь за рахунок різних припущень і апроксимацій призводить до того, що реальні аналітичні моделі приладів та пристроїв мають малу точність і в значній мірі близькі до формальних моделей, але вони дозволяють швидко і легко визначити приблизну область робочих параметрів.

Підвищення точності фізико-математичних моделей досягається застосуванням чисельних методів розв’язання диференційних рівнянь і створенням чисельних математичних моделей, які отримали значне поширення в зв’язку з

розробкою ефективних алгоритмів розрахунку систем диференційних рівнянь на комп'ютерах [94]. Для автоматизованого проектування приладів та пристроїв ці моделі мають найбільшу цінність.

За характером набору вихідних параметрів математичні моделі приладів поділяють на фізико-топологічні, електричні і технологічні [95].

У фізико-топологічних моделях вихідними параметрами являються геометричні розміри елементів приладу, фізичні характеристики джерел носіїв заряду і робочого середовища. Ці моделі враховують фізичні процеси, в приладі і його оточені. Результати отримують з рішення системи рівнянь, зазвичай заснованій на рівняннях Максвела – законах збереження частинок, заряду, енергії і кількості руху, а також включають в себе матеріальні рівняння, крайові і початкові умови на компонентах і на границях розрахунку. Набір диференційних рівнянь визначається кількістю процесів, які впливають на роботу приладу.

Рівняння записуються в приватних похідних, так як простір і час вважаються безперервними, фізико-топологічні моделі відносяться до класу розподілених моделей. Моделі дозволяють розраховувати параметри приладу і його робочий режим і являються найбільш продуктивними для аналізу фізичних процесів в приладі і його проектування. Для створення цих моделей використовують теоретичні методи, але часто в них включають також елементи формального моделювання.

Електричні моделі електронних приладів є результатом розв'язання рівнянь, що описують електричну еквівалентну схему приладу, і відносяться до класу зосереджених моделей з дискретними просторовими елементами. Вихідними параметрами моделей є параметри елементів еквівалентної схеми, які або розраховуються за фізико-топологічними моделям [96], або визначаються експериментально. Електричні моделі дозволяють розраховувати параметри приладу і його робочий режим. На особливу увагу заслуговують моделі, які дозволяють аналізувати фізичні процеси в приладах [97,98,99].

Результати фізико-топологічного моделювання включають в себе:

одно-, дво- і тривимірні описання розподілу електростатичного потенціалу, об'ємного заряду, поля струмів у компонентах приладу, напруженості

електричного та магнітного полів в робочому просторі приладу, концентрацій носіїв заряду і їх фізичні характеристики, траєкторії часток, тощо.

Робота ВЧ приладів з концентрацією магнітного поля заснована на ряді ієрархічно пов'язаних процесів. Наприклад, у вакуумному випарнику з концентрацією магнітного поля (див. рис. 2.2) протікають пов'язані процеси [91]:

- проходження електричного струму по індуктору з урахуванням скін-ефекту;
- індукція магнітного поля навколо провідників індуктора;
- індукція електричного струму в зовнішній поверхні концентратора;
- протікання струму по концентратору;
- індукція струму у тиглі в навантаженні в ньому;
- нагрівання компонентів електричним струмом;
- випромінювання з всіх поверхонь;
- емісія з усіх нагрітих поверхонь електронів;
- емісія парових частинок з відкритої поверхні завантаження в тиглі;
- дрейф електронів у схрещеному електромагнітному полі;
- дифузія потоку парових часток від поверхні випаровування;
- запалювання електричного розряду та виникнення плазми в потоці парових часток.

часток.

Досліджуваний електронний прилад або пристрій може відтворювати декілька з означених процесів, які на сьогодні описані фізико-математичними моделями. Здебільшого ці моделі проаналізовані для ідеалізованих систем з компонентами, як правило, з необмеженими еквідистантними поверхнями [100].

Для тривимірного дослідження фізичних процесів у складних приладах з кінцевими розмірами компонентів необхідно проводити послідовно розрахунки процесів в обмеженому просторі компонентів з урахуванням впливу зовнішніх факторів, які породжуються в сусідніх компонентах приладу.



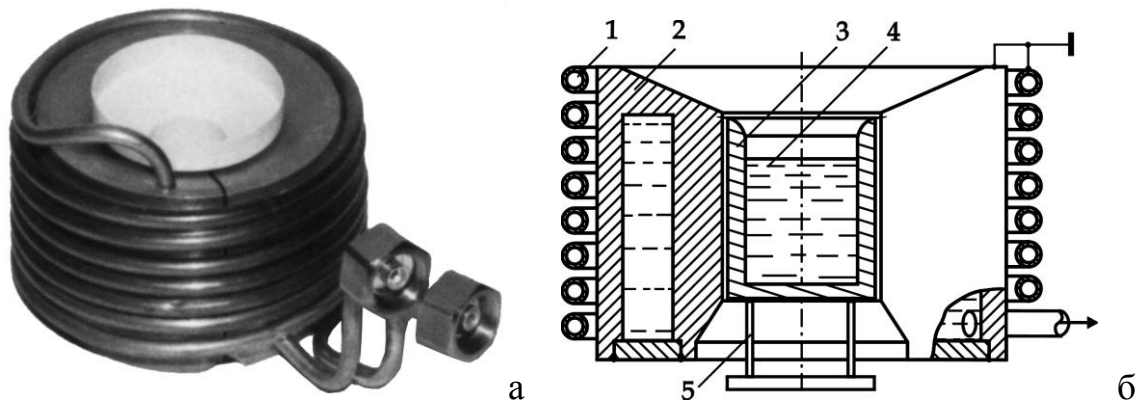


Рис.2.2 Вакуумний випарник з ВЧ концентрацією електромагнітного поля (комбінація індуктора і ВЧ трансформатора): а – зовнішній вигляд; б – осьовий перетин: 1 – індуктор; 2 – концентратор; 3 – тигель; 4 – завантаження; 5 – стійка

Першим етапом такого дослідження є декомпозиція процесів у приладі і з'ясування ієрархії процесів. У табл.2.2 наведено приклад декомпозиції моделі електронного приладу з ВЧ концентрацією магнітного поля по фізичним процесам. Для кожного з досліджуваних у дисертаційній роботі приладів декомпозиція процесів буде здійснена у наступних розділах.

Таблиця 2.2 Декомпозиція моделі електронного приладу з ВЧ концентрацією магнітного поля по фізичним процесам

№	Фізичний процес	Результат, який передається	Параметр, який регулюється
1	Індукція струмами ВЧ	електромагнітне поле, поле струмів	число витків індуктора, частота струму, напруга індуктора
2	Нагрівання завантаження і тигля	температура поверхні випаровування	положення тигля в індукторі, діаметр тигля
3	Випаровування з тигля	направленість і інтенсивність потоку часток	діаметр поверхні завантаження
4	Емісія електронів	струм термоемісії	потенціал тигля
5	Іонізація парових часток	ступінь іонізації, струм іонів	частота струму, напруга індуктора

### 2.1.3 Визначення початкових та граничних умов розрахунку пов'язаних фізичних задач

ВЧ прилади з концентрацією магнітного поля зазвичай відносяться до потужних приладів електроніки і включають до свого складу компоненти, які

виготовлені з металів. Ізолятором в таких приладах виступає вакуумне середовище, яке оточує компоненти. До початкових умов в моделях цих приладів відносяться геометричні розміри компонентів та їх взаємне розміщення. Інші початкові умови визначаються фізикою процесу який досліджується. Для електромагнітних фізико-математичних моделей початковими умовами також є електричний потенціали на деяких поверхнях (або в точках) або струми через поверхні (або точки). Для моделі теплопровідності, яка визначає температурне поле в компонентах, початковою умовою є розподіл джерел тепла та анізотропія теплових властивостей компонентів. Приклади початкових та граничних умов для дослідження процесів у приладах з ВЧ концентрацією магнітного поля наведено в табл..2.3.

Таблиця 2.3 Граничні та початкові умови при фізико-топологічному моделюванні приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля

Вид фізико-математичної моделі	Початкові умови	Граничні умови
електромагнітна	потенціали на поверхні, струми через них	потенціали на границі дослідження
теплопровідності	розподіл джерел струму, анізотропія властивості речовин	температура поверхонь, теплові потоки через поверхні
гідродинамічна	розподіл температури на оточуючих поверхнях, розподіл пандеромоторних сил	потік тепла з відкритої поверхні
емісійна	розподіл температури на поверхні, емісійні властивості речовин	задача не обмежена границями
трекінг заряджених часток	розподіл напруженості магнітного та електричного полів	час розрахунку або енергія часток
запалювання електричного розряду	енергія електронів, щільність парового потоку, щільність потоку електронів, енергія іонізація парових часток	задача не обмежена границями

Суттєвою відмінністю дослідження фізико-топологічних моделей є пов'язаність всіх її фізико-математичних моделей через початкові умови відповідно до ієрархії процесів. Початкові умови кожного процесу (фізико-математичної моделі) завжди залежать від результату розрахунку характеристик переднього процесу (фізико-математичної моделі). А результат кінцевого в ієрархії процесу використовують для з'ясування вектору зміни початкових умов першого

процесу, якщо критерій вірного результату не задовольняє заданому.

При дослідженні процесів у приладах з ВЧ концентрацією магнітного поля використовують всі три типи граничних умов [101]:

1. Граничні умови першого роду:  $u(x, y)|_{\Gamma} = u_0$  – задається значення функції  $u(x, y)$  на границі.

2. Граничні умови другого роду:  $\left. \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma} = u_0$  – задається градієнт функції  $u(x, y)$  на границі.

3. Граничні умови третього роду:  $\left( \alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \right) \Big|_{\Gamma} = u_0$ .

У всіх випадках границею може бути границя області дослідження поля, або границя поверхні компонента приладу.

Для коректної постановки задачі про знаходження температури в будь-якій точці тіла в кожен момент часу слід до рівняння теплопровідності додати початкові і граничні умови, які будуть визначати початковий розподіл температури всередині тіла і тепловий режим на границі. Початкові умови матимуть вигляд:

$$u|_{t=0} = \varphi(x, y, z). \quad (2.1)$$

Граничні умови можуть задаватися декількома різними способами, наприклад:

1. У кожній точці поверхні  $M(x, y, z, t) \in S$  задається температура

$$u|_S = \mu_1(M, t). \quad (2.2)$$

2. На поверхні тіла задається тепловий потік  $q = -k \frac{\partial u}{\partial \vec{n}}$ , який визначає

граничні умови виду

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \right|_S = \mu_2(M, t). \quad (2.3)$$

Таким чином, в загальному випадку задача про поширення тепла в ізотропному тілі коректно ставиться таким чином: знайти рішення рівняння теплопровідності, що задовольнить початковій умові (2.1) і одній з граничних умов (2.2) або (2.3).

## 2..2 Застосування прикладних пакетів для розрахунків фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля

Розвиток чисельних методів розрахунку та точність розрахунку, яку забезпечують на тепер комп'ютери та програми, дозволили визнати фізико-топологічне моделювання віртуальним експериментом з гарантованою достовірністю результатів. В наукових проектах фізико-топологічне моделювання з використанням сертифікованих програмних пакетів визнається як науковий експеримент, бо при адекватному фізичній сутності моделі дозволяє отримувати адекватні фізичній сутності результати. Серед понад 500 програмних продуктів, які пропонують вирішувати диференційні рівняння у приватних похідних чисельним методом скінчених елементів, найбільш універсальними та поширеними є американський ANSYS та європейський COMSOL Multiphysics [102,103]. Їх головною перевагою є мультифізичне вирішення задач, тобто рішення в одному розрахунковому просторі (розрахунковій сітці) всіх фізико-математичних задач.

Прикладні пакети програм для тривимірного аналізу електромагнітних та гідродинамічних процесів в твердих, рідких і газоподібних середовищах (ANSYS, COMSOL Multiphysics, тощо) не доступні для повноцінного використання в Україні за фінансовими обмеженнями. Ці пакети орієнтовані в основному на використання організаціями, фінансово спроможні обслуговувати пакети. Широкому колу користувачів не доступна робота в таких пакетах. Однак розроблені методи моделювання, і в тому числі розглянутий метод [104], дозволяють створювати власні програмні продукти, орієнтовані на рішення спеціалізованих задач методом скінчених елементів. Проведені дослідження, показали високу збіжність результатів моделювання з експериментальними даними, з чого можна зробити висновок про доцільність використання методу скінчених елементів для дослідження процесів в електронних приладах.

### 2.2.1. Методи скінчених різниць і скінчених елементів при розрахунку електромагнітних полів.

При вирішенні диференціальних рівнянь в приватних похідних, коли аналітичні методи розрахунку не вдавалися, найбільшого поширення набули методи дискретизації аналізованих просторів [105-108]. Існує два майже ідентичних методи: метод скінчених різниць (МСР) і метод скінчених елементів (МСЕ). Математики показали можливість використання МСЕ для вирішення рівнянь в приватних похідних широкого класу, в тому числі і рівнянь електродинаміки [109,110]. При вирішенні деяких завдань інші методи ефективніше ніж МСЕ за розміром матриці і кількістю ітерацій, але не по точності розрахунків [111].

Розрахунок розподілу напруженості електромагнітного поля і поля струмів в компонентах електронних приладів, які нагріваються, за допомогою МСР і МСЕ нашоюхується на ряд проблем:

- 1) складна конструкція компонентів приладів, що нагріваються, в тому числі з концентраторами електромагнітного поля, екранами, тиглями складної конфігурації;
- 2) залежність всіх електрофізичних і теплофізичних параметрів матеріалів компонентів приладів від температури;
- 3) зміна положення поверхонь емісії в процесі дослідження;
- 4) необхідність вирішувати окремо задачу знаходження розподілу індукованих струмів в компонентах приладів і задачу визначення температурного поля в завантаженні і тиглі;
- 5) евристичний підхід до визначення меж розрахункової області електромагнітного поля, що впливає на точність результатів розрахунку.

МСР і МСЕ найбільш ефективно застосовувати при розрахунку складних по конструкції приладів [112,113] і при розрахунку поля в замкнутих обмежених областях. Цим вимогам конструкції приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля відповідають повністю. Техніка застосування МСР стосовно індукційного нагріву докладно розглянута в [114].

Аналіз процесів у компонентах приладів за допомогою МСЕ може проводитися за моделями з різною розмірністю. Для більшості задач обмежуються двома вимірами, тобто досліджують модель приладу для в площині, як область нескінченно протяжної пластини довільного перетину, або для області з осью симетрії [115].

Для МСЕ розроблені методи оптимізації розмірів елементів розбиття досліджуваної області, в залежності від необхідної точності дослідження. Це дозволяє значно зменшити час розрахунку. МСЕ досить ефективний при розрахунку розподілу в просторі і в часі електромагнітного поля, особливо в областях з криволінійними границями [116, 117]. При розрахунку поля в областях з простими границями МСЕ не має переваг перед МСР.

МСР заснований на формулюванні початково-крайових задач для диференціальних рівнянь в варіаційні задачі для інтегральних функціоналів від шуканих функцій. Сенс такого формулювання полягає в тому, що при цьому знижується порядок похідних, що дозволяє далі шукати апроксимацію точного рішення в вигляді суперпозиції базисних функцій, до яких пред'являються менш суворі вимоги на гладкість, ніж до вирішення вихідної початково-крайової задачі [117]. З цієї причини варіаційне формулювання початково-крайової задачі так само називають слабкою формою диференціального рівняння. Коефіцієнти, з якими базисні функції входять в суперпозицію, називаються в термінології МСР ступенями свободи.

В МСР використовуються базисні функції з локальним носієм (тобто не рівні нулю на обмеженій частині простору). Область, в якій конкретна базисна функція не дорівнює нулю, називається коміркою кінцево-елементної сітки. Використання базисних функцій з локальним носієм, наприклад, лагранжевих квадратичних базисних функцій [137], дозволяє звести слабку форму вихідної задачі (за умови, що коефіцієнти при часткових похідних не залежать від рішення) до системи лінійних алгебраїчних рівнянь з розрідженою матрицею, рішення якої не складає утруднень.

### 2.2.2 Похибка чисельних розрахунків моделей при аналізі процесів в за фізико-топологічними моделями

Похибку розрахунку MSE за фізико-топологічними моделями встановлюють порівнянням отриманих рішень з аналітичними рішеннями фізико-математичних моделей, які вдається отримати при спрощеннях моделей. Найбільш поширене спрощення при аналітичних рішеннях – це перехід до одновимірної моделі. Для випадку одновимірної моделі існують рішення для всіх типів диференціальних рівнянь у приватних похідних. За фізичним сенсом рішення за одновимірною моделлю відповідає розподілу шуканої функції вздовж обраної координати. А ізотропність досліджуваного простору дозволяє поширити це рішення на весь простір з урахуванням законів симетрії.

При розрахунку чисельними методами визначається матриця значень коефіцієнтів поліномів, що описують фізичну величину, які відповідають точкам в просторі-часі. Розподіл фізичної величини в просторі утворює поле, значення якого між вузлами матриці визначається інтерполяцією. Розмір матриці вибирається виходячи з обраної точності і можливості обчислювальних засобів.

Для розрахунку потоків, струмів, енергій, потужностей і т.д. (інтегральних значень фізичних величин) проводиться обчислення в околиці вузла обраної характеристики, і далі – підсумовування значень у всіх околицях в межах обраного контуру. Зазвичай обирається контур, що обмежує компонент або простір моделі. Необхідно розрізняти два види похибок, що виникають при розрахунках:

- похибка визначення значень фізичних величин в вузлах матриці простору-часу;
- похибка визначення інтегральних значень, при використанні елементів матриці.

Похибка визначення значень фізичних величин в вузлах матриці простору-часу визначається граничною величиною помилки, яку задає дослідник, а також точністю визначення початкових даних і граничних умов. Гранична величина помилки при сучасних обчислювальних потужностях може бути обрана на рівні –  $10^{-8} \div 10^{-10}$ .

Значення інтегральних характеристик усереднюється по області дослідження і похибка їх визначення виходить такого ж порядку що і похибка визначення значень фізичних величин в вузлах матриці МСЕ, тобто –  $10^{-8} \div 10^{-10}$ .

Окрім геометричних параметрів до початкових даних при фізико-топологічному моделюванні приладів являються електричні, теплофізичні, гідродинамічні, емісійні, інерційні та інші властивості матеріалів і середовищ. До початкових даних відносяться також електричні потенціали, частота струму джерела живлення, напруженості електричного та магнітного полів, температура компонентів приладу, тощо.

Однією з проблем моделювання є те, що теплофізичні і електричні властивості речовин, при високих температурах, особливо в розплавленому стані, вивчені неповно. Дані у довідниках не систематизовані, для різних матеріалів дані існують в різному і обмеженому діапазоні температур. Доводиться використовувати в розрахунках величини за інтерполяцією або екстраполяцією даних з довідників та наукової літератури. Тому похибка визначення початкових даних для різних матеріалів зазвичай визначається значенням з точністю рівня  $10^{-1} \div 10^{-2}$ .

Також для рішення задач за фізико-топологічними моделями необхідно задавати у якості граничних умов теплові потоки з поверхонь на випромінювання і випаровування (теплофізичні задачі). При визначенні інтенсивності потоків також використовувалися дані про властивості речовин при заданій температурі і стані поверхні компонента приладу, які визначалися за довідковою літературою з похибкою на рівні  $10^{-1} - 10^{-2}$ .

Можна зробити висновок, що похибка чисельних розрахунків при використанні різницевих методів визначається тільки похибкою визначення фізичних властивостей речовин, які вводяться в модель як початкові та граничні умови.

Фізико-топологічні моделі кожного приладу характеризуються деякими особливостями, вимагають додаткових специфічних обмежень, що зазначено у відповідних розділах роботи. Наприклад, при розробці тест задач для перевірки достовірності отриманих результатів і в дослідженні деяких конструкцій приладів



приймалося, що всі компоненти мають однакову температуру, тобто є ізотермічними. Швидкість випаровування речовини також приймалася однаковою для будь-якої точки поверхні випаровування завантаження тигля.

## 2.3 Структура та склад фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля

### 2.3.1 Загальні ознаки структури та складу фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля

Робота приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля визначається певним набором фізичних процесів, які пов'язані між собою через зміну стану компонентів приладу і впливом електромагнітного поля. Для аналізу пов'язаних фізичних процесів використовують комбіновані фізико-математичні моделі.

На всі процеси у приладах з ВЧ концентрацією впливає електромагнітне поле, яке характеризується розподілом напруженості магнітного та електричного поля в оточенні компонентів. Це наочно видно на ієрархічній структурі фізико-топологічної моделі вакуумного випарника (рис.2.3). Результати розрахунку комбінованої фізико-математичної моделі електромагнітного поля і поля струмів використовуються як початкові умови для розрахунку фізико-математичних моделей залежних від них процесів.

Для визначення теплових полів використовують індукційно-теплові моделі, пов'язані з чисельними рішеннями диференціальних рівнянь Максвелла для електромагнітного поля і рівняння Фур'є для теплового поля [118]. В результаті визначають температурне поле в обраному просторі в певний момент процесу.

Особливістю визначення температурного поля є необхідність вирішення двох комплексних пов'язаних задач різного типу:

1. Пряма задача – визначення електромагнітного поля індукованого ВЧ струмами індуктора і концентратора, та струмів в компонентах випарника, індукованих електромагнітним полем;

2. Зворотна задача – визначення струмів в тиглі і завантаженні випарника, необхідних для нагрівання його до заданої температури.

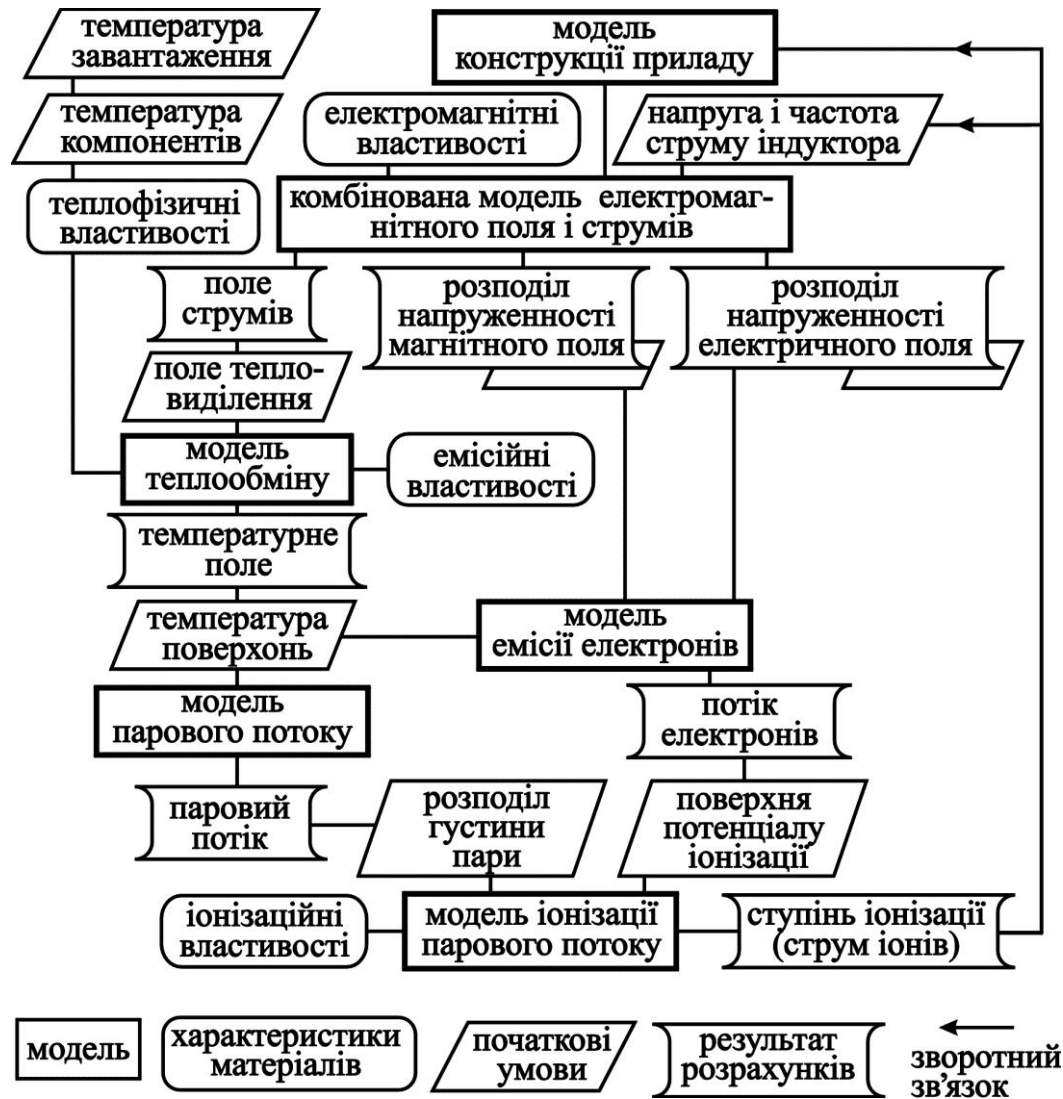


Рис.2.3 Фізико-топологічна модель індукційного випарника  
(внизу показано позначення елементів моделі)

Це передбачає наступний алгоритм вирішення задачі:

- визначається характеристики електромагнітного поля в просторі випарника і розподіл струмів в електропровідних компонентах при заданій частоті струму і величині напруги на індукторі;
- визначається розподіл джерел тепла в компонентах, які нагріваються (тиглі і завантажені, індуктори і концентраторі);
- вирішується задача знаходження температурного поля в компонентах, які нагріваються.
- визначається температура поверхні, з якої випаровується завантаження.

Якщо обчислена температура не відповідає обраній температурі випаровування, розрахунок повторюється наново при відкоригованій величині

напруги на індукторі, або частоті струму.

Запропонований алгоритм дозволяє проводити аналіз впливу параметрів моделі на характеристики функціонального процесу приладу.

### 2.3.2 Фізико-математична комбінована модель електромагнітного поля і поля струмів

Аналіз електромагнітного поля змінних струмів індуктора складається в розрахунку просторового розподілу електричної і магнітної напруженості поля, створюваного прикладеним до індуктора змінним струмом (синусоїдально змінюються в часі).

Комбінована модель аналізу електромагнітного поля і поля струмів заснована на чисельному розрахунку МСР рівнянь Максвелла для електромагнітного поля [114,118].

З урахуванням осової симетрії конструкцій приладів, які планується дослідити, проводити моделювання та дослідження доцільно в циліндричних координатах.

Постановка задачі при індукції ВЧ струмів полягає у визначенні характеристик наступних елементів моделі:

- властивості середовищ: остаточна атмосфера (вакуум), ортотропні матеріали з постійною магнітною проникністю, електропровідність компонентів під напругою або зі струмом.

- джерела поля: прикладена напруга, повний струм індуктора, щільність струму або однорідне зовнішнє поле.

- граничні умови: задане значення потенціалу (умова Діріхле), задані значення дотичній складової індукції на поверхні границі (умова Неймана).

Аналіз магнітного поля змінних струмів полягає в розрахунку розподілу напруженості магнітного поля в просторі приладу, який генерується змінними струмами індуктора та концентратора (змінюються в часі за синусоїдою) і інших провідників.

Всі компоненти поля і електричні струми змінюються як

$$z = z_0 \cos(\omega t + \varphi_z),$$

де  $z_0$  – амплітудне (максимальне) значення  $z$ ,  $\varphi_z$  – фазовий кут, і  $\omega$  – кутова частота зміни поля.

Аналіз спрощується якщо величини, які змінюється гармонійно, представити у вигляді комплексних чисел:

$$z = z_0 e^{i(\omega t + \varphi_z)},$$

де дійсна і уявна частини мають зсув по фазі на  $90^\circ$  по відношенню один до одного, так що їх лінійна комбінація може представляти довільний фазовий кут.

З комплексної величини отримуємо миттєві, діючі і амплітудні значення:

– миттєве значення при даній фазі  $\varphi_0 = -\omega t_0$

$$z_{\varphi_0} = \operatorname{Re}[z_0 e^{i(\varphi_z - \varphi_0)}] = z_0 \cos(\varphi_z - \varphi_0);$$

– максимальне значення  $z_0$ ;

– діюче значення  $z_R = \frac{\sqrt{2}}{2} z_0$ .

Струм в індукторі та концентраторі розглядається як сума стороннього струму, порушеного зовнішнім електричним ланцюгом, і вихрового струму, індукованого змінним магнітним полем:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{стор}} + \mathbf{j}_{\text{вихр}}. \quad (2.4)$$

Опис електромагнітного поля представляється диференціальним рівнянням в приватних похідних щодо комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  – вектор магнітної індукції) [114]. Вважається, що вектор магнітної індукції  $\mathbf{B}$  лежить в площині моделі ( $z0r$ ), а вектор щільності електричного струму  $\mathbf{j}$  і векторний магнітний потенціал  $\mathbf{A}$  ортогональні до нього.

Тільки компоненти змінних полів –  $j_\theta$  і  $A_\theta$  відмінні від нуля. Будемо використовувати позначення  $j$  і  $A$ , тоді з урахуванням

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right); \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z},$$

отримаємо для осесиметричної моделі вираз

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - i\omega \cdot \gamma \cdot A = -j_{\text{стор}}, \quad (2.5)$$

де електропровідність  $\gamma$  і компоненти тензора магнітної проникності  $\mu_z$  і  $\mu_r$  постійні в межах області, що відноситься до кожного компонента моделі. Складові струму  $j_{\text{стор}}$  приймається обернено пропорційною радіусу ( $\sim 1/r$ ).

До частот зміни поля порядку мегагерц щільність струму зміщення не впливає на електромагнітні процеси. Тому у закону Ампера

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

не враховуємо складову  $\partial \mathbf{D} / \partial t$ , тобто щільністю струму зміщення нехтуємо.

Тобто маємо:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}.$$

Величини, що описують магнітне поле в будь-якій його точці змінюються в часі синусоїдально, тобто магнітні властивості матеріалів розглядаємо, як лінійні.

Матеріали індуктора, концентратора, тигля і завантаження можна вважати ізотропними. В однорідних ізотропних середовищах, якими є метали, електропровідність не залежить від напрямку і напруженості електричного поля, і пов'язані законом Ома:

$$j = \sigma E \quad j = \sigma E.$$

Це дозволяє використовувати у фізико-математичній моделі інтегральні значення магнітної проникності і електропровідності компонентів.

### **Визначення граничних умов моделі.**

Відсутність нормальної складової індукції на осі симетрії і на границях області розрахунку задається через умову Діріхле, яка задає певне значення векторного магнітного потенціалу  $A_0$  [114]. Ця умова визначає нормальну компоненту вектора магнітної індукції. Для осесиметричної задачі умова Діріхле задається у функції координат:

$$rA_0 = a + b z r + c r^2 / 2,$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – постійні для кожної поверхні, і можуть змінюватися від однієї поверхні до іншої. Тоді зовнішнє однорідне поле задається ненульовою нормальною компонентою магнітної індукції на гладкій ділянці границі компонентів.

При розрахунках приймався напрям вектора позитивної нормалі правим.

На осях симетрії моделі приладів задається однорідна гранична умова Діріхле, тобто значення нормальної складової індукції дорівнює нулю ( $B_n = 0$ ).

Якщо  $\alpha$  – кут нахилу поверхні до осі  $z$ , то нормальна компонента індукції

$$B_x = c \sin \alpha + b \cos \alpha.$$

Значення константи  $a$  на різних поверхнях підбирається узгодженням умов Діріхле, при дотриманні умови безперервності функції  $A_0$  на границях середовищ (дотичних поверхонь).

На площинах магнітної антисиметрії, якщо явно не вказані інші види граничних умов, задаються граничні умови Неймана. До площин магнітної антисиметрії відносяться зовнішні та внутрішні границі досліджуваної області.

Однорідна умова Неймана:

на зовнішніх границях  $H_t = \sigma$ ;

на внутрішніх границях  $H_t^+ - H_t^- = \sigma$ ,

де  $H_t$  – тангенціальна складова напруженості магнітного поля. Індекси "+" і "-" позначають значення ліворуч і праворуч від поверхні, а  $\sigma$  – лінійна щільність поверхневого струму, яка визначається під час розрахунків.

### **Електрофізичні властивості компонентів.**

Необхідно врахувати, що температурне поле у компонентах приладів зазвичай в робочому стані сильно неоднорідне і для розрахунків треба враховувати залежність електромагнітних та теплофізичних характеристик речовин від температури.

Завантаження в тиглі випарника або контакти у комутуючих приладах в робочих режимах мають відмінну від початкової температуру. В одних випадках нагрівання є методом досягнення робочого режиму в інших є наслідком процесів у робочих режимах. У будь якому разі теплофізичні та електромагнітні характеристики компонентів приладу змінюються під час роботи і при розрахунку за моделями необхідно враховувати цю зміну в робочому режимі. Від цього залежить адекватність результатів розрахунків.

У вакуумному випарнику для отримання заданої інтенсивності парового потоку завантаження нагрівають до температури, зазвичай вище температури

плавлення. В розрахунках необхідно враховувати значення електрофізичних та теплофізичних характеристик тигля і завантаження в залежності від температури безпосередньо до температури випаровування. Температура випаровування – це температура, при якій тиск насичених парів над поверхнею випаровування становить  $p = 1,33 \text{ Па} = 10^{-2} \text{ торр}$  [119]. Такий режим при випаровуванні матеріалів у вакуумі дозволяє проводити осадження плівок і покриттів з необхідною для вакуумної технології швидкістю. Зазвичай метали з початку плавляться, а потім досягають температури випаровування. Деякі метали досягають температури випаровування в твердому стані (Cd, Zn, Mn, Cr), активно сублімують, тобто їх температура випаровування знаходиться нижче температури плавлення.

При дослідженнях в моделі використовувалися експериментальні дані залежності від температури електричної провідності речовин. У табл.2.4 наведено електропровідність деяких металів при температурі випаровування. Дані про властивості речовин отримані з експериментальних даних лінійною інтерполяцією найближчих виміряних значень в діапазоні температур. Дані з джерел [120,121] наведені як приклад неоднозначності довідкових даних.

Таблиця 2.4. Фізичні властивості металів при температурі випаровування

	Температура випаровування		питомий електроопір	
Метал	К		$\times 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$	
Алюміній	<b>1480</b>	1490	<b>32,822</b>	31,6913
Золото	<b>1605</b>	1670	<b>34,83</b>	34,444
Мідь	<b>1545</b>	1530	<b>22,86</b>	20,45
Нікель	<b>1770</b>	1800	<b>83,292</b>	108,5
Срібло	<b>1305</b>	1300	<b>17,856</b>	
Титан	<b>1976</b>	2010	<b>169</b>	
Хром	<b>1665</b>	1670	<b>78,3</b>	
Джерело	[119]	[120]	[120]	[121]

\* Дані з лівих стовпчиків використовувалися в розрахунках.

У науковій літературі наведені різні значення для температури випаровування металів (наприклад [119,121]), а для деяких речовин дані взагалі відсутні. Майже для всіх речовин розроблено формули апроксимації [119], але вони застосовуються в обмеженому діапазоні тисків і, відповідно, температур.

Формули апроксимації зручні при розрахунках, але вони не охоплюють усього температурного діапазону технологічних процесів.

Найбільш поширені тиглі в технології вакуумного випаровування це тиглі, які виготовлені з тугоплавких металів – з молібдену і танталу. Під час випаровування тиглі не тільки повинні витримувати температурне навантаження, але і бути хімічно пасивними до матеріалу завантаження при температурі випаровування завантаження.

У табл.2.5 наведені дані про електричні властивості молібдену при температурі випаровування міді ( $T=1545\text{ K}$ ).

Таблиця 2.5 Електропровідність молібдену при температурі випаровування міді ( $T=1545\text{ K}$ )

Електропровідність, См/м	Джерело
2420350	[115]
2535000	[118]

У разі моделювання випарника з діелектричними або напівпровідниковими тиглями задача і алгоритм знаходження рішення не змінюється. Задача зводиться до визначення фізичних властивостей обраного матеріалу.

Індуктори і концентратори виготовляються з немагнітного матеріалу з найбільшою електропровідністю. Зазвичай індуктор виготовляють з мідних трубок (для охолодження водою) з перерізом круглої або прямокутної форми.

Переваги трубчастого провідника з прямокутним перерізом:

- зменшується імпеданс індуктора, тобто зменшується активний опір і зменшується індуктивність індуктора, що підвищує електричний к.к.д. ;
- нагрівання тигля і завантаження більш рівномірне.

Робоча температура індукторів з водяним охолодженням в приладах зазвичай не перевищує  $50^{\circ}\text{C}$  і в розрахунках приймалося значення  $320\text{ K}$ .

Також для розрахунків необхідно задати або струм в індукторі, або напругу, яка прикладена до нього, яка є джерелом електромагнітного поля.

### **Розрахункові величини.**



У дисертаційному дослідженні вакуумного випарника з концентратором електромагнітного поля визначаються наступні величини:

1. Величина і розподіл струмів в тиглі і завантаженні, для оптимізації конструкції елементів випарника.

2. Розподіл напруженості магнітного і електричного поля в просторі випарника, який може використовуватися в моделі розряду в парах матеріалу завантаження.

3. Омічні втрати, які використовуються в якості джерел тепла при визначенні температурного поля в завантаженні (комбінована термоелектрична задача);

4. Власна і взаємна індуктивність індуктора та концентратора, і імпеданс провідників (повний комплексний опір змінному струму) для порівняння к.к.д. різних режимів експлуатації і конструкцій випарника.

Вплив магнітних сил на парові частинки не досліджується, через незначний вплив їх на процеси випаровування.

### 2.3.3. Фізико-математична модель теплообміну у тиглі з завантаженням

При проектуванні приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля необхідно визначати розподіл температури в різних компонентах приладу і на їх поверхнях. Теплообмін в твердих тілах описується нелінійним рівняннями теплопровідності, внаслідок залежності теплофізичних характеристик матеріалів від температури. При розплавленні всі матеріали змінюють стрибком свої теплофізичні властивості і характер залежності їх від температури теж змінюється.

Слід відмітити, що у задачах отримання парових потоків динаміка зміни теплофізичних характеристик матеріалів тигля і завантаження не представляють інтересу. Зміна температури відбуваються при підготовці технологічного циклу, під час технологічних пауз. Вакуумні випарники завжди використовуються в стаціонарному режимі, який вимагає постійну робочу температуру поверхні випаровування. Це дозволяє досліджувати моделі теплообміну, які ґрунтуються на рішенні стаціонарного рівняння теплопровідності, а граничними умовами виступає радіаційний теплообмін на всіх поверхнях і потік тепла з поверхні випаровування.

Фізико-математична модель температурного поля у тиглі з завантаженням заснована на чисельному розрахунку методом скінченних різниць нелінійного рівняння теплопровідності в циліндричних координатах [122]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

де  $T$  – температура;  $t$  – час;  $\lambda(T)$  – ізотропна теплопровідність;  $q$  – питома потужність тепловиділення;  $c(T)$  – теплоємність;  $\rho$  – щільність речовини.

Все теплофізичні властивості речовини: теплопровідність  $\lambda(T)$ , питома потужність тепловиділення  $q$ , теплоємність  $c(T)$  і щільність  $\rho$  повинні відповідати температурі випаровування матеріалу завантаження. Ці значення визначаються за довідковою літературою.

Для стаціонарної задачі

$$c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

Тоді рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}) = -q(T) \quad (2.6)$$

Процеси теплообміну у випарнику при використанні металевого або діелектричного тигля ідентичні. Якщо тигель металевий, то завантаження нагрівається в основному тепловим потоком з тигля. При діелектричному тиглі джерела тепла виникають безпосередньо в поверхневих шарах завантаження, а тигель виступає споживачем тепла.

На рис.2.4 наведені схему, яка пояснює процеси теплообміну у тиглі з завантаженням, що впливають на встановлення температурного поля.

Температурне поле стінки тигля (висотою  $h$ ) над розплавом завантаження встановлюється в результаті теплообміну на відкритих (оточених вакуумом) поверхнях і на границі між тиглем і завантаженням. Джерелом теплоти виступає нагрівання ВЧ струмами (джоулево тепло) зовнішньої циліндричної поверхні металевого тигля або циліндричної поверхні навішування в діелектричному тиглі.

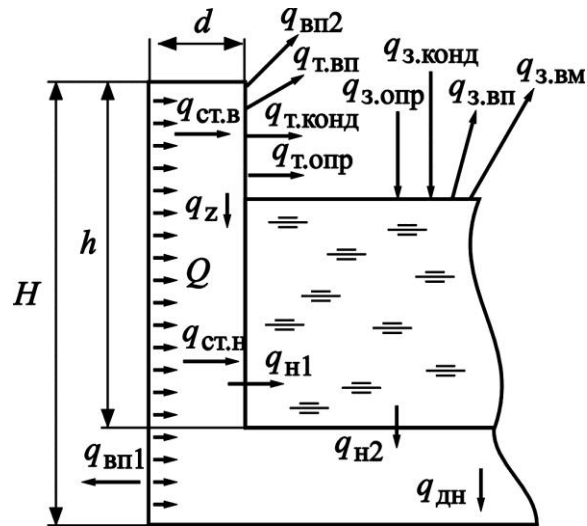


Рис.2.4 Теплові потоки, які визначають початкові та граничні умови при рішенні моделі теплопередачі в тиглі з завантаженням

### Визначення граничних умов моделі.

Теплообмін на поверхнях металевого тигля здійснюється, по-перше, при теплопередачі (рис.2.4):

- з зовнішньої стінки тигля до внутрішньої  $q_{ст}$ ;
- від стінки тигля до завантаження (розплавленого металу)  $q_{з1}$ ;
- від завантаження на дно тигля  $q_{з2}$ ;
- від внутрішньої поверхні дна до зовнішньої  $q_{дн}$ ;
- випромінюванням з зовнішньої  $q_{вп1}$  і внутрішньої вільної стінок  $q_{вп2}$ , і дна тигля  $q_{вп3}$ ;

- випромінюванням з вільної поверхні завантаження (дзеркала розплаву)  $q_{з.вп}$ ;
- випаровуванням з дзеркала розплаву завантаження  $q_{з.пар}$ ;
- випаровуванням з внутрішньої стінки тигля  $q_{т.пар}$ .

По-друге, поглинанням тепла в наслідок:

- конденсації молекул на стінці тигля  $q_{т.конт}$ ;
- конденсації молекул на поверхні завантаження  $q_{з.конт}$ ;
- опромінення стінки тигля дзеркалом розплаву і стінкою тигля  $q_{т.опр}$ ;
- опромінення дзеркала розплаву стінкою тигля  $q_{з.опр}$ .

У разі відмінності теплових потоків в стінці тигля вище рівня дзеркала розплаву завантаження  $q_{\text{СТ.В}}$  і нижче  $q_{\text{СТ.Н}}$ , виникне тепловий потік в стінці  $q_z$  уздовж осі  $Oz$  (див. рис.2.4).

При частотах вище 100 кГц скін-шар менше товщини стінки металевого тигля і це дозволяє знехтувати силовою дією електромагнітного поля на розплав завантаження. Рух розплаву в тиглі внаслідок різниці температур не суттєвий, і є позитивним, бо сприяє вирівнюванню температурного поля у завантаженні.

Для визначення температурного поля тигля з завантаженням необхідно визначити наступні параметри:

- теплофізичні властивості речовин при робочій температурі: теплопровідність, теплоємність, щільність, ступінь чорноти.
- джерела тепла: об'ємну теплову дію електричного струму (джоулеве тепло) в тиглі з завантаженням.
- граничні умови: тепловий потік, який забезпечують парові молекули, і тепловий потік випромінювання з усіх поверхонь тигля з завантаженням при робочій температурі.

Складові теплообміну на стінці складається з теплообміну зі стінками тигля і теплообміну з дзеркалом розплаву завантаження. Теплообмін зі стінками тигля дорівнює нулю відповідно до закону збереження, що підтверджують і закони Ламберта для випромінювання і Кнудсена для випаровування з точки на поверхні кола. При рівномірній інтенсивності випромінювання уздовж кола загальна кількість енергії, яку випромінює точки кола на це ж коло, дорівнює кількості енергії, яку випромінює коло в цю точку. Такий саме балансу і для теплового потоку частинок випаровування.

### **Теплофізичні властивості компонентів вакуумного випарника.**

Теплофізичні властивості тиглів вакуумного випарника при робочій температурі наведені в табл.2.6

Таблиця 2.6 Теплофізичні властивості тиглів при 1545 К

Фізичні властивості	Молібден	
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	9973,5	
Теплоємність, Дж/(кг·К)	331,925	331,77

Теплопровідність, Вт/(м·К)	96,602	
Джерела	[123]	[124]

У табл.2.7 наведені теплофізичні властивості металів при температурі випаровування.

Таблиця 2.7 Теплофізичні властивості металів при температурі випаровування [123]

Метал	щільність	теплоємність	температ уророві дність	питома теплопров ідність
	г/см <sup>3</sup>	Дж/(кг·К)	м <sup>2</sup> /с	Вт/(м·К)
Алюміній	2,199 [120]	1176,73 [124]	43,36	117,6*
Золото	17,6	157		120
Мідь	7,965	513,9	22,625	181,48
Нікель	7,8*	735	12,1*	69,5*
Палладій	11,29*	347,5*	23,4*	89,5*
Титан		989,2		32,5
Хром	6,836	877,78	9,3	55,8

Дані про властивості речовин отримані з експериментальних даних лінійною інтерполяцією найближчих вимірних значень в діапазоні температур;

\* – дані отримані лінійної екстраполяцією крайніх вимірних значень довколишнього температурного діапазону.

Для розрахунку за моделлю необхідно задати температуру поверхонь, які оточують випарник. Тигель з завантаженням оточує концентратор, який охолоджується водою. В розрахунках доцільно приймати його температуру рівною 325 К (48°C), що близько до натурних режимів роботи випарника. Індуктор також охолоджується водою, але не впливає на температурне поле в тиглі з завантаженням.

Зазвичай випарник використовують у вакуумі де відсутній конвективний теплообмін, і тому він не враховується у теплових розрахунках поля температур.

Граничні умови, які визначають тепловий потік (граничні умова другого роду), включають радіаційні теплові потоки з поверхонь тигля і завантаження, є результатом радіаційного теплообміну між усіма поверхнями, і залежать від температури поверхонь  $T$ :

$$q_{изл} = k_{CB} \cdot \alpha (T^4 - T_0^4),$$

де  $k_{CB} = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(град}^4 \cdot \text{м}^2)$  – константа Стефана-Больцмана,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання поверхні,  $T_0$  – температура поверхонь навколишнього обладнання. Параметри  $\alpha$  і  $T_0$  можуть бути різні на різних поверхнях компонентів випарника.

Коефіцієнт поглинання поверхні у науковій літературі також називають ступенем чорноти, ступенем сірості, коефіцієнтом випромінювання, коефіцієнтом інтегрального випромінювання, і він залежить від матеріалу, стану його поверхні і температури.

Поверхню випаровування (дзеркало розплаву завантаження) і можна порівнювати за ступенем чорноти до шліфованої поверхні. Внутрішня стінка тигля в процесі випаровування покривається плівкою речовини завантаження, внаслідок осадження молекул, що випарувалися з завантаження. До того ж, розплавлені метали часто змочують матеріал тигля і, в цьому випадку, плівка на стінці тигля буде за властивістю аналогічна до дзеркала розплаву, тобто на ступінь чорноти поверхні.

Навколишнє обладнання нагрівається в результаті радіаційного теплообміну з випарником. Але для підтримки вакуумних умов технологічного процесу навколишнє обладнання охолоджується. В цьому випадку, можна прийняти температуру поверхонь навколишнього обладнання 300 К.

Решта зовнішні поверхні тигля вважатимемо полірованими, що відповідає металевому тиглю. Тиглі для випарників під час технологічних процесів отримання парових потоків, тобто при температурі випаровування, ретельно очищаються від забруднень. В цьому випадку можна використовувати експериментальні дані з довідкової літератури для коефіцієнта чорноти чистих матеріалів. Для отримання парових потоків використовуються матеріали високої очищення, тобто для завантаження можна використовувати експериментальні дані ступеня чорноти чистих матеріалів.

У розрахунках використовувалися значення коефіцієнтів поглинання поверхні, які наведені в табл.2.8 в графі "розрахунок". Для алюмінію значення отримано екстраполяцією експериментальних даних, для інших речовин – інтерполяцією.

Таблиця 2.8. Ступінь чорноти металів

Метал	T, K	$\alpha$	Джерело	Розрахунок
TiB <sub>2</sub> +TiC	300-3320	0,032-0,39	[123]	<b>0,3</b> (1480 K)
Молібден полірований	811-1647	0,1-0,18	[125]	0,17*(1545 K)
Молібден полірований	1400-1600	0,142-0,166	[121]	<b>0,16</b> (1545 K)
Мідь розплавлена	1348-1547	0,16-0,13	[126]	<b>0,13</b> (1545 K)
Алюміній розплавлений	477-866	0,038-0,06	[127]	<b>0,13</b> (1480 K)

Дані про властивості речовин отримані з експериментальних даних лінійною інтерполяцією найближчих виміряних значень в діапазоні температур.

\* – дані наведені для порівняння і визначення ймовірної похибки.

Теплові втрати, пов'язані з випаровуванням молекул матеріалу завантаження, спостерігаються тільки на поверхні випаровування і можуть бути представлені таким виразом

$$q_{\text{исп}} = W \cdot L, \quad (2.7)$$

де  $W$  – швидкість випаровування речовини, кг/(м<sup>2</sup>с);  $L$  – прихована теплота випаровування, Дж/кг.

В табл.2.9 наведені значення теплового потоку з поверхні випаровування, отримані за експериментальними даними швидкості випаровування і теплоти випаровування металів.

Таблиця 2.9. Емісійні властивості завантаження вакуумних випарників

Метал	Температура випаровування (при p=1,333 Па)	швидкість випаровування	Теплота випаровування		Тепловий потік
			кал/моль	Дж/г	
Алюміній	1480	0,788	67950	10544	8557,11
Мідь	1545	1,18	72810	4797	5607,91
Література	[119]	[119]	[128]		за (2.7)

Розрахунок температурного поля МСЕ і МСР поширений внаслідок складності аналітичного рішення, і часто використовуються в прикладних пакетах комп'ютерних програм для комплексних розрахунків полів: електромагнітних,

температурних, деформаційних, тощо. Існуючі програми можуть виконувати як статичні, так і динамічні розрахунки температурних полів. Методи схожі і зводяться до вирішення систем лінійних або нелінійних диференціальних (статичні режими) або алгебраїчних (динамічні режими) рівнянь. Різні пакети програм накладають ті чи інші обмеження на розрахунок температурного поля, можуть враховувати або не враховувати рух розплаву, залежність фізичних величин від температури і т.п.

Загальний підхід до вирішення польових задач МСЕ викладено в [129]. Представляє особливий інтерес підхід до вирішення рівнянь теплопровідності МСР, що враховує рух провідного середовища (накладення поля швидкостей на кінцево-різницеvu сітку температурного поля) в динамічних розрахунках [130]. Рух розплаву призводить до вирівнювання температури в завантаженні. Часто у випарниках застосовуються спеціальні конструктивні і електромагнітні обмеження для придушення магнітогідродинамічних процесів в розплаві завантаження.

Для рішення задачі необхідно задати граничні і початкові умови теплообміну на границях компонентів (граничні умови третього і четвертого роду), відомих температур (гранична умова першого роду) і потужність джерел тепла, яке виділяється в окремих вузлах сітки (гранична умова другого роду) [130-132].

Коефіцієнти теплопровідності є функціями температури і, в загальному випадку, залежать від координат простору і часу. Методи інтегрування таких рівнянь математичної фізики не розроблені. Але існує багато способів вирішення диференціальних рівнянь, коли параметри досліджуваної області є функціями двох змінних: координат простору і часу, наприклад класичні методи (Фур'є, джерел), методи інтегральних перетворень [130]. Найбільш часто для інтегрування рівнянь теплопередачі з рухом середовища використовується метод Ейлера [133].

### 2.3.5 Фізико-математична модель парового потоку з вакуумного випарника

Випаровування завантаження з поверхні, що межує з вакуумом при температурах значно менших за температуру кипіння можна розглядати як випаровування з ідеального випарника. У таких випарниках випаровування



відбувається зі швидкістю, яка пропорційна тиску насиченої пари над поверхнею і описується рівнянням Герца-Кнудсена [120]

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (2\pi mkT)^{-1/2} \cdot p^*, \quad (2.8)$$

де  $dN_e$  – число молекул, які випарувалися,  $A_e$  – площа поверхні випаровування;  $dt$  – час випаровування;  $m$  – маса молекули завантаження;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура на поверхні, що випаровує;  $p^*$  – тиск насичених парів.

Ленгмюр показав, що вираз (2.8) можна застосувати при випаровуванні не тільки з поверхні рідини, а й з поверхні твердого тіла (ленгмюрівське або вільне випаровування).

З (2.8) швидкість випаровування по масі  $\Gamma$  з одиниці поверхні:

$$\Gamma = m \frac{dN_e}{A_e dt} = (m / 2\pi kT)^{1/2} p^*, \quad (2.9)$$

а кількість речовини, яка випарувалася з усієї поверхні випарника за час  $t$  при нестационарному випаровуванні:

$$M_e = \iint_{tA} \Gamma dA_e dt. \quad (2.10)$$

Значення швидкості випаровування металів табульовані Дешманом [119] і для деяких металів приведені в табл.2.9.

Для визначення розподілу парового потоку у просторі в (2.10) задають функцію розподілу молекул за напрямками. Поверхня розплаву це джерело поверхневого типу, а для випарника поверхневого типу функція розподілу пари описується законом, встановленим Кнудсеном [120]. Без врахування умов конденсації, отримаємо вираз для розподілу парових частинок на відстані :

$$\frac{dM_r(\varphi, \theta)}{dA_r} = \int_0^t \frac{M_e(t)}{\pi R^2(t)} \cos \varphi(t) \cos \theta(t) dt, \quad (2.11)$$

де  $dM_r$  – кількість речовини, що перетинає поверхню площею  $dA_r$ ;  $\varphi(t)$  – кут випаровування;  $\theta(t)$  – кут перетину поверхні – кути між нормаллю до поверхонь випаровування і перетину і вектором, що з'єднує точку випаровування і перетину;  $R(t)$  – відстань між точками конденсації і площини перетину ( $R = \sqrt{(x_a - x_t)^2 + (y_a - y_t)^2 + (z_a - z_t)^2}$ ).

Величини  $R$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$  залежать від координат точок випаровування і перетину, а при взаємному їх переміщенні і від часу  $t$ . Тоді фізико-математична модель масопереносу  $dM_r$  в точку на площі  $dA_r$  набуде вигляду:

$$\frac{dM_r}{dA_r} = \left[ \frac{m}{2\pi^3 k} \right]^{1/2} \cdot t \iint_{A_e} \frac{p^*}{\sqrt{T}} \cdot \frac{\cos \varphi_i \cos \theta_i}{R^2} dA_e dt. \quad (2.12)$$

Аналітичне рішення задачі визначення розподілу парового потоку над джерелом за допомогою (2.12) можливо тільки для простої конструкції випарників при ряді спрощень: наприклад, для плоского дискового випарника з ізотермічною поверхнею, яка паралельна поверхні конденсації [120].

Для розрахунку розподілу в реальних системах джерело парових часток представляють набором гладких поверхонь, в межах яких можливе визначення аналітичного виразу для розподілу. Якщо це не можливо, поверхню представляють у вигляді елементарних поверхневих джерел (ЕД), в межах яких масоперенос в точку досліджуваної площини приймають постійним, а загальний масоперенос визначають підсумовуванням вкладу всіх ЕД [134].

У цьому випадку інтегрування в (2.12) замінюється підсумовуванням і для стаціонарного процесу вираз набуде вигляду:

$$\frac{dM_r}{dA_r} = \left[ \frac{m}{2\pi^3 k} \right]^{1/2} \cdot t \sum_{i=1}^n \frac{p^*}{\sqrt{T}} \cdot \frac{\cos \varphi_i \cos \theta_i}{R^2} \delta_i^2, \quad (2.13)$$

де  $\delta_i^2$  – розмір ЕД,  $n$  – число елементарних джерел, а множник  $\frac{p^*}{\rho} \cdot \left[ \frac{m}{T 2\pi k} \right]^{1/2}$  – є швидкістю випаровування завантаження по товщині.

У реальних системах [135] можливий перегрів або охолодження краю тигля щодо розплаву навішування, що впливає на розподіл парових часток над тиглем.

### Початкові умови моделі

Модель розраховується при наступних умовах:

– випаровування відбувається у вакуумі і рух парових частинок є вільно-молекулярним без повернення на поверхню випару через зіткнення з молекулами пари або газу;

- швидкість випаровування з плоскої поверхні розплаву в тиглі не залежить від координат і є визначеним параметром (визначається температурою розплаву);
- швидкість випаровування з внутрішніх стінок тигля над поверхнею розплаву не залежить від висоти і відрізняється від температури навішування на фіксовану величину;
- випаровування з верхньої кромки і зовнішніх стінок тигля відсутнє;
- кутовий розподіл щільності парового потоку з точки на поверхні випаровування визначається косинусоїдальним законом Кнудсена [120];
- внутрішні стінки тигля покриті шаром матеріалу завантаження внаслідок конденсації і змочування стінок розплавом завантаження, тобто приймається, що швидкість надходження речовини з розплаву на стінки більше швидкості випаровування;

### **Результати моделювання**

За розподілом парового потоку у просторі можна встановити просторові межі виникнення електричного розряду в парі матеріалу завантаження.

Під час випаровування навішування змінюється внутрішня висота стінок тигля вільних від завантаження, і зростає спрямованість парового потоку, тобто розподіл парових часток над тиглем.

#### **2.3.6 Фізико-математична модель іонізації парового потоку**

Іонізація парового потоку відбувається внаслідок зіткнення парових частинок з електронами, які емітують з нагрітих поверхонь компонентів випарника або електродів комутаційних приладів. Іонізація відбувається, коли емітований електрон при прискоренні до зіткнення з атомом пари набуває енергію достатню для її іонізації. Коли електрони після іонізації до наступного зіткнення також можуть придбати енергію достатню для іонізації, виникає лавина генерації електронів і іонів у просторі пари – виникає розряд у парах завантаження.

Електрон прискорюється у ВЧ електричному полі, яке створює індуктор з концентратором.

Електричне  $\vec{E}$  і магнітне  $\vec{B}$  поля діють на електрон  $e$ , що рухається зі швидкістю  $\vec{v}$  з силою, яка визначається формулою Лоренца [136]:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{v}\vec{B}]. \quad (2.14)$$

Причому магнітне поле  $\vec{B}$  не змінює швидкості електронів, але впливає на їх траєкторію, діючи під прямим кутом до вектора швидкості  $\vec{v}$ . При осьовій симетрії приладу, і без врахування початкових швидкостей термоелектронів, траєкторії електронів будуть також симетричними відносно осі. Але використання МСР для розрахунку і сучасних алгоритмів програмування дозволяють розраховувати тривимірні траєкторії (трасувати) електронів з урахуванням особливостей конструкції приладу і електромагнітних режимів роботи.

### Іонізація парових частинок (атомів).

Виникнення іонів в парах матеріалу завантаження над тиглем випарника залежить від двох умов:

- достатня енергія електронів для ударної іонізації атомів з парового потоку  $E_e = mv^2/2 > E_i$  (див. табл.2.10);
- достатня ймовірність зіткнення електронів з атомами, яка визначається густиною парового потоку в частині простору над випарником де енергія електронів більше енергії іонізації.

Таблиця 2.10 Енергія іонізації атомів металів [128]

метал	Al	Cu	Cr
$E_i$ , eV	5,984	7,72	6,76

Енергію електрон набуває, прискорюючись в електричному полі. Для можливості іонізувати атом електрону необхідно пройти в просторі електричного поля точки з різницею потенціалів більше енергії іонізації.

### 2.3.7 Фізико математична модель електричного поля

Тривимірний розподіл електричного потенціалу (структура електричного поля) в просторі пристрою з ВЧ концентрацією електромагнітного поля визначається чисельним розрахунком за МСР рівняння електричного потенціалу  $\varphi$ :

$$\nabla \cdot \left( \left[ \varepsilon - \frac{ig}{\omega} \right] \nabla \varphi \right) = 0, \quad (2.15)$$

де  $g$  – електропровідність,  $\varepsilon_z$  і  $\varepsilon_r$  – компоненти тензора діелектричної проникності, які постійні в межах кожного компонента досліджуваного приладу. Рівняння (2.15) отримано спільним рішенням рівняння Пуассона для електростатичного поля ( $\nabla \cdot \varepsilon \vec{E} = \rho$ ), і рівняння розтікання струмів в електропровідному середовищі ( $\nabla \cdot \vec{j} = -i\omega\rho$ ) при врахуванні закону Ома ( $j = gE$ ) [101].

У випадку осесиметричних досліджень використовують двовимірні моделі на основі рівняння (2.15):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \varepsilon_r r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -\rho, \quad (2.16)$$

де  $r$  і  $z$  – радіальна і осьова координати моделі пристрою.

### Граничні умови.

Для дослідження електричного поля приладу за моделлю задаються граничні умови у вигляді потенціалів струмопровідних поверхонь (умова Діріхле):

– на границях розрахункової області потенціали приймається рівними нулю ( $\varphi_0 = 0$ ), внаслідок заземлення оточуючого обладнання;

– потенціал на верхньому витку індуктора и на концентраторі визначається з рішення задачі пов’язаної моделі у досліджуваному приладі: для випарника – це модель теплообміну у тиглі з завантаженням; для комутуючих пристроїв – це модель траєкторії електронів;

– потенціал на нижньому витку індуктора приймається рівним нулю  $\varphi_I = 0$ .

Приклад двовимірного розрахунку структури електричного поля у просторі між компонентами приладу графічно показано на рис.2.5, де показані потенціали поверхонь, еквіпотенціальні лінії з кроком  $\Delta\varphi$ . На границях обриву області моделювання задається умова «напруженість поля колінеарна з границею» як окремий випадок умови 2-го роду.

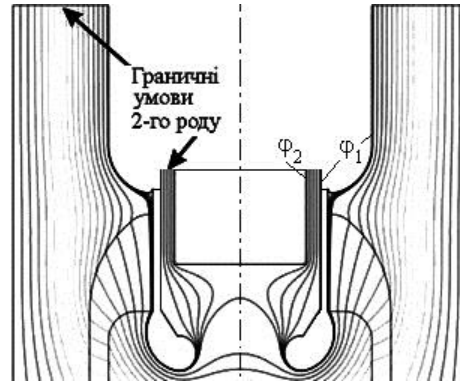


Рис.2.5 Розподіл електричного поля в просторі компоненті приладу під електричним потенціалом

Структура поля не змінюється при зміні фази або частоти струму індуктора, і визначається виключно конструкцією компонентів приладів. На структуру поля впливають тільки електричні заряди.

Просторова щільність заряду враховується правою частиною рівняння Пуассона, тому для моделювання електричного поля розробляють алгоритм обчислення щільності заряду в вузлах розрахункової сітки з трикутних елементів, якщо на компонентах приладу можуть накопичуватись заряди: діелектричні ізолятори в конструкціях.

### 2.3.8 Фізико-математична модель емісії електронів

Електрони в область парового потоку емітуються завантаженням і відкритими поверхнею тигля, внаслідок термоелектронної емісії.

Кількість термоелектронів залежить від температури і роботи виходу матеріалу і описується рівнянням Річардсона-Дешмана [114]:

$$j_T = A_0(1 - \bar{R})T^2 e^{-\frac{\varphi_T}{kT}}, \quad (2.17)$$

де  $A_0 = \frac{4\pi emk^2}{h^3} = 120,14 \cdot 10^4 \text{ A/(m}^2 \cdot \text{K)}$  – універсальна емісійна стала,  $\varphi_T$  –

термоелектронна робота виходу,  $\bar{R}$  – усереднений коефіцієнт відбиття електронів від потенційного бар'єру поверхні емітера,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$  – постійна Больцмана,  $e$  і  $m$  – заряд та маса електрона,  $h$  – стала Планка.

В табл.2.11 наведені термоелектронні властивості металів, з яких виготовляються компоненти приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. За емпіричними даними визначалися значення струмів емісії для початкових даних моделі.

Таблиця 2.11 Робота виходу і питомий струм термоемісії металів

метал	$\varphi_T$ , эВ	$j_T$ емпіричні дані, А/м <sup>2</sup> [1]	$j_T$ , А/м <sup>2</sup> при температурі випаровування*	Площа емітера, м <sup>2</sup>	$i_T$ , А розрахунок
W	4,54	$9,14 \times 10^{-4}$ (1500 K)	$5,6 \times 10^{-4}$ (1480 K)	$9,74 \times 10^{-5}$	$5,45 \times 10^{-8}$
Mo	4,2	$2,90 \times 10^{-2}$ (1600 K)	$9,0 \times 10^{-3}$ (1545 K)	$9,74 \times 10^{-5}$	$8,77 \times 10^{-7}$
Al	4,25		$4,14 \times 10^{-3}$ (1480 K)	$9,43 \times 10^{-4}$	$3,90 \times 10^{-6}$
Cu	4,40		$5,70 \times 10^{-3}$ (1545 K)	$9,43 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-6}$
Cr	4,58		$2,25 \times 10^{-2}$ (1670 K)	$\sim 9,43 \times 10^{-4}$	$2,12 \times 10^{-5}$

\* – дані отримані інтерполяцією з графіків рис.2.6

На рис.2.6 представлені графіки залежності струму термоемісії металів, з яких складається завантаження і виготовляються тиглі, від температури, за якими визначаються значення струму при температурі випаровування. Графіки відображають залежність (2.17) і отримані при  $\bar{R} = 0,5555$  для збігу з емпіричними значеннями в контрольованих точках. За графіками визначалися значення питомого струму емісії при температурі випаровування, які зведені в табл.2.11.

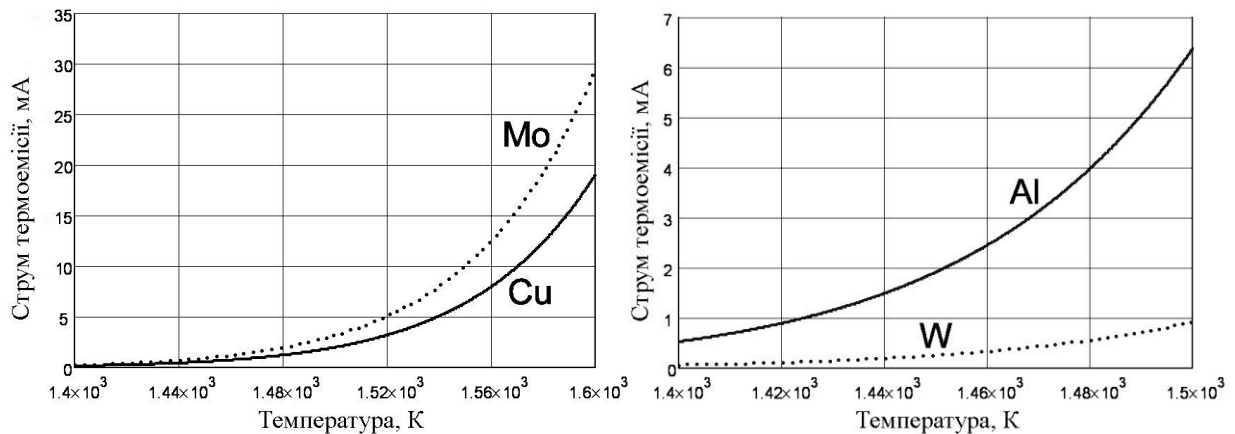


Рис.2.6 Графіки залежності струму термоемісії матеріалів завантаження і тиглів від температури

Результати розрахунків показують, що з урахуванням співвідношення площі емісії завантаження є основним емітером термоелектронів.

### 2.3.9 Розрахунок траєкторії електронів в електромагнітному полі

компонентів приладів

Для з'ясування величини енергії електронів і ймовірності їх зіткнення з атомами парового потоку необхідно аналізувати характер руху електронів в просторі парового потоку. За величиною і структурою електричного поля встановлювалися траєкторії електронів при різних початкових умовах з наступними обмеженнями:

- релятивістські ефекти через малі прискорюють напруг не враховуються;
- електростатичне поле не змінюється в часі (стаціонарний режим);
- всередині кінцевого елемента розрахункової сітки електростатичне поле змінюється лінійно;
- вплив просторового заряду електронів в рівнянні руху не враховується (апроксимація нескінченно малим струмом);
- для всіх електронів емітованих завантаженням і тиглем прийнята кінетична енергія, яка дорівнює середній енергії електронів за розподілом Максвелла при температурі випаровування.

В силу малої маси електронів можна вважати, що при зміні полярності напруги встановлення рівноважного розподілу за об'ємом, швидкості іонізації відбуваються миттєво. А оскільки особливості іонного потоку на колекторі не цікаві, то можна вважати, що потенційне поле у пристроях є вакуумним. Щоб останнім спрощенням не вносити сильних відмінностей від реальності, необхідно, щоб в кожній фазі роботи пристроїв між електродами була достатня різниця потенціалів.

У відповідності зі зробленими припущеннями траєкторія електрона в тривимірному електростатичному полі описується системою диференціальних рівнянь Ньютона:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{q}{m} E_x(x, y, z); \\ \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{q}{m} E_y(x, y, z); \\ \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{q}{m} E_z(x, y, z). \end{cases} \quad (2.18)$$



Рівняння, що визначає довжину  $l(t)$  траєкторії в момент часу  $t$ :

$$\frac{dl}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}.$$

Інтегрування системи рівнянь (2.18) проводиться числовим методом Мерсона-Рунге-Кутта: автоматичний вибір кроку, чисельне інтегрування припиняється безпосередньо перед границею кінцевого елемента; в останній точці всередині елемента проводиться екстраполяція траєкторії за допомогою перших трьох членів розкладання Тейлора відносно часу часу. Отримане рівняння вирішується за допомогою формули Тартагілья-Кордано і враховує зменшення порядку рівняння в однорідних або нульових полях.

Для знаходження траєкторії електрона в неоднорідному електричному полі необхідно задати його масу, заряд, початкову швидкість і напрямок вильоту з поверхні. При розрахунках кут вильоту відраховується між напрямком вектора швидкості і напрямом нормалі до поверхні емісії (проти годинникової стрілки). Кут між напрямком емісії і площиною моделі прийнятий однаковим для всіх частинок в пучку.

В результаті визначається довжина траєкторії, загальний час польоту, швидкість електрона в розрахунковій точці траєкторії.

Заряд електрона –  $1,60217657 \times 10^{-19}$  Кулона.

Маса електрона –  $9,10938291 \times 10^{-31}$  кілограма.

Початкова швидкість емітованих електронів залежить від температури і їх енергії розподілені відповідно до функції розподілу Максвелла. У розрахунках для всіх електронів емітованих завантаженням і тиглем прийнята як середня енергія електронів за розподілом Максвелла [138]:

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = 2kT.$$

При температурі 1480 К вона складе  $E = 4,08672 \times 10^{-20}$  Дж = 0,2551 еВ.

Середня швидкість таких електронів становить:

$$\bar{v} = 2\sqrt{\frac{kT}{m}} = 2\sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1480}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 2,995 \cdot 10^5 \text{ [м/с]}.$$

За такої швидкості електрон в вакуумі пролетить відстань 5 см (покине простір приладу) за час  $t = s/\bar{v} = 1,67 \times 10^{-7}$  с.

Півперіод синусоїди електромагнітного поля у поверхні тигля з завантаженням при частоті коливань 440 кГц становить:

$$\tau = 1/2f = 1/(880 \times 10^3) = 1,136 \times 10^{-6} \text{ с.}$$

Протягом позитивного півперіоду поля на електрон діє сила, яка прискорює його від поверхні термоемітера, в негативний півперіод поля термоелектрони обмежені полем в області об'ємного заряду у поверхні емітера.

Таблиця 2.12. Швидкості електронів в просторі приладу

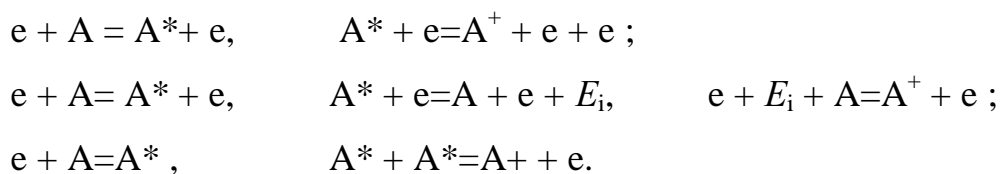
метал	Al	Cr	Cu
енергія іонізації $E_i$ , eV	5,984	6,76	7,72
потенціал простору, В	6	7	8
швидкість електрона, м/с	1453000	1569000	1678000

Шлях  $s$ , який електрон повинен вільно пролетіти, щоб іонізувати молекулу залежить від напруженості поля:

$$s = \frac{E_i}{E}.$$

### 2.3.10 Фізико-математична модель процесів іонізації

Іонізація електронами відбувається за схемою  $e + A = A^+ + e + e$ . Такий тип іонізації називається прямою іонізацією. Тут  $A$  – молекула або атом парового потоку. Однак можлива іонізація і при меншій енергії електрона, який налітає на атом, якщо вона перевищує енергію збудження  $E_{зб}$ . Така послідовність іонізації називається асоціативною іонізацією, і проходить в два етапи, за участю збуджених молекул  $A^*$ . Умова початку асоціативної іонізації виражається співвідношенням  $E > mv^2/2 > E_{зб}$ . Можливі такі схеми асоціативної іонізації:



Довжина вільного пробігу – середня відстань, яку проходить електрон або іон до непружного зіткнення з молекулою

$$l_i = 1/(4pnr^2); \quad l_e = \frac{1}{pnr^2} = \frac{1}{n^2 k T r^2}, \quad (2.19)$$

де  $n$  – концентрація молекул,  $r$  – їх радіус,  $kT$  – теплова енергія,  $p$  – тиск.

Таблиця 2.13 Параметри, що впливають на іонізацію парового потоку

метал	Енергія іонізації, eV	Енергія іонізації, кДж/моль	Радіус атома, пм
Al	5,984	577.5	143
Cu	7,72	745,0	128
Cr	6,76	652,4	130

В зіткненні енергія електрона втрачається і електрон не може нескінченно прискорюватися. Довжина вільного пробігу електрона більше, ніж іона і електрон має більшу рухливість.

Наведені в літературі значення довжини вільного пробігу  $l_{e1}$  зазвичай даються для тиску 1 мм рт.ст. і температури 0 С. Тоді для тиску  $p$  –  $l_e = l_{e1}/p$ .

Якщо енергія на довжині пробігу достатня, після першого зіткнення в об'ємі з'являється додатково 1 електрон і іон, після другого – ще 2 електрони і 2 іони і т.д. Виникає т.зв. лавина.

Електронна лавина – експоненціальне зростання кількості носіїв заряду в проміжку від катода до анода за рахунок ударної іонізації молекул електронами

$$n = n_0 \cdot e^a d.$$

Коефіцієнт  $a$  називається коефіцієнтом ударної іонізації. Він визначається донорно-акцепторними властивостями молекул, залежить від довжини вільного пробігу і сильно залежить від напруженості поля.

Виникнення лавини – це ще не електричний пробій. Для пробію необхідно, щоб після проходження лавини на катоді знову з'явився електрон. Після цього виникає повторна лавина, потім ще лавина і т.д. Виникає самостійний розряд. Для самостійності розряду необхідно виривання електронів з катода позитивними іонами, або фотонами. Для оцінки процесу вводять коефіцієнт  $g$  – вторинний іонізаційний коефіцієнт, що характеризує ймовірність появи на катоді нового електрона після проходження однієї лавини. Для щільності електричного струму можна отримати вираз

$$j = j_0 \cdot e / (1 - g (e^a d - 1)).$$

Умовою самостійності розряду є поява на катоді хоча б одного електрона після проходження лавини:

$$1 - g(e^a d - 1) = 0. \quad (2.20)$$

Оскільки коефіцієнт ударної іонізації залежить від напруженості поля, довжини вільного пробігу, а отже і тиску з умови самостійності можна отримати залежність розрядної напруги від зовнішніх чинників, т.зв. закон Пашена  $U=f(p \cdot d)$ , або в іншому вигляді  $E/p=F(p \cdot d)$ . Тут  $p$  – тиск в газі,  $d$  – проміжок між електродами.

Після пробою газового проміжку він заповнюється газорозрядною плазмою. Надалі, в залежності від потужності джерела напруги, в проміжку розвиваються різні види розрядів. Наприклад, якщо джерело малопотужне і тиск невеликий, то розвивається тліючий розряд.

На тепер самим досконалим засобом комп'ютерного моделювання розрідженої плазми є метод PIC – частинок в комірках (particle in cell) [139], проте навіть сучасні PIC-програми для обчислення самоузгоджених полів надзвичайно незручні у використанні.

Найбільш потужною програмою для розрахунку різноманітних електродинамічних явищ у розрідженій плазмі методом PIC є програма MAGIC, що розвивається компанією Orbital ATK [140] з складним алгоритмом використання. З іншого боку, існують програми з зручними інтерфейсами користувача. Це, перш за все, Comsol Multiphysics, CST Studio, ANSYS, тощо. CST Studio навіть включає в себе PIC-вирішувач, який дозволяє погоджувати тільки електромагнітне поле і рух заряджених частинок з фіксованим джерелом. Наприклад, форму і інтенсивність джерела частинок узгодити з іншими величинами вже неможливо.

Comsol Multiphysics не має готового PIC-вирішувача, але надає користувачеві потужну командну мову на основі Matlab (Comsol Script), за допомогою якого можна розробити власні програми моделювання плазмових пристроїв.

Для обчислення самоузгоджених розподілів просторових зарядів, швидкості іонізації і електричного поля зручно використовувати метод «предиктор-коректор» на основі можливостей програм Comsol Multiphysics і Comsol Script. Методика полягає в тому, що щільність зарядів (а саме, предиктори щільності) і швидкість іонізації обчислюються ітераційно. На кожній ітерації вирішується рівняння Пуассона – обчислюється електричне поле, а з цього поля обчислюються

"коректори" щільності зарядів. В даному методі "предиктори" щільності заряду на наступній ітерації обчислюються як лінійні комбінації "предикторів" і "коректорів" на попередній ітерації. Коефіцієнти в цих лінійних комбінаціях підбираються таким чином, щоб забезпечувалася збіжність – тобто зменшення відмінності "предикторів" від "коректорів" від ітерації до ітерації.

## 2.4 Висновки до розділу і постановка задачі дослідження

1. Фізико-топологічні моделі та методики дослідження процесів в приладах з ВЧ концентрацією електромагнітного поля повинні забезпечувати рішення задачі, вихідними даними для яких є технологічні параметри а результатом дослідження – конструкції параметри і режим живлення індуктора. Фізико-топологічні моделі приладів являються найбільш адекватними і продуктивними для аналізу фізичних процесів в приладі і для його проектування. Для створення фізико-топологічних моделей використовують теоретичні методи, але часто в них включають також елементи формального моделювання.

2. Вибір конструкції приладу з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, визначення способів і засобів забезпечення оптимальних режимів його роботи є складними взаємопов'язаними задачами проектування. Для ефективного вирішення цієї задачі, для оптимізації конструкції і режимів експлуатації приладів необхідно застосування методів фізико-топологічного моделювання. Хоча комп'ютерні програми і самі комп'ютери розвинуті до задовільної для ефективного дослідження потужності, методики моделювання приладів обмежені окремими спеціалізованими прикладами. Фізико-топологічні моделі приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного представлені частково і потребують подальшого розвитку.

3. Всі процеси, на яких ґрунтується робота приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, описані фізико-математичними моделями. Але здебільшого ці моделі проаналізовані для ідеалізованих систем: з компонентами, як правило, з необмеженими еквідистантними поверхнями; з одновимірним аналізом процесів.

4. Існує дефіцит в програмних засобах, які дозволяють моделювати діаграму спрямованості парового потоку з тиглів і прогнозувати характер виникнення розряду в ньому.

5. Інтегральна похибка чисельних розрахунків при використанні МСР визначається тільки похибкою визначення фізичних властивостей речовин, які вводяться в модель як початкові умови і складають в загальному випадку одиниці відсотків.

6. Запропоновано узагальнену фізико-топологічну модель приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. Дослідження за фізико-математичною моделлю дозволяють передбачити характер і параметри електричних, теплових і емісійних процесів в компонентах приладів і паровому потоці випарника.

На основі ієрархічного дослідження пов'язаних фізичних процесів запропонована методика вибору конструкції приладу і задача його дослідження:

- визначення впливу конструкції компонентів приладу на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію частинок парового потоку і ефективність колімації потоку електронів;

- визначення впливу фізичних властивостей компонентів приладу на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію нейтральних частинок і ефективність колімації потоку електронів;

- визначення впливу частоти струму індуктора на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію парових частинок і ефективність колімації потоку електронів.

7. МСЕ і МСР найбільш придатні для досліджень за фізико-математичними моделями роботи приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. Використання комерційних універсальних пакетів комп'ютерних програм (європейський лідер COMSOL Multiphysics) дозволяє подолати труднощі при моделюванні та дослідженні конструкцій будь-якої складності, при двохвимірному і тривимірному моделюванні, при динамічному та стаціонарному розгляді.

8. У науковій літературі спостерігається суттєва розбіжність в значеннях, які характеризують теплофізичні та емісійні властивості металів (наприклад [123,124]), а для деяких речовин дані взагалі не вдається відшукати. Майже для

всіх речовин розроблено формули апроксимації [122], але вони застосовуються в обмеженому діапазоні тиску пари і, відповідно, температур. Формули апроксимації зручні при розрахунках, але вони не охоплюють усього температурного діапазону технологічних процесів, які аналізуються при розрахунках.

9. При частотах вище 100 кГц скін-шар менше товщини стінки металевого тигля і можна знехтувати силовою дією електромагнітного поля на розплав завантаження. Рух розплаву в тиглі внаслідок різниці температур не суттєвий, і є позитивним, бо сприяє вирівнюванню температурного поля у завантаженні. Тому температуру поверхні завантаження в тиглі можна вважати ізотропною.

10. Стаціонарний ітераційний метод моделювання електростатичних систем з просторовим зарядом і об'ємною іонізацією, може бути реалізований з використанням інструментів комерційних програмних пакетів для MСР-моделювання. В розділі означено межі застосовності методу.

11. Як основний висновок за матеріалом проведеного дослідження слід зазначити, що проблема розробки фізико-топологічних моделей приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля є на сьогодні актуальною, незважаючи на значну кількість наявних в літературі варіантів їх застосування.

Найбільш перспективним напрямком в даній області розглядається розробка випарників у вакуумно-плазмових технологіях і комутаційних приладів для силової електроніки. У випадках, де параметри надійності, стабільності і терміну служби приладів є одними з ключових, застосування методів комп'ютерного дослідження генерації та колімації потоків електронів представляється в якості одного з найбільш перспективних варіантів. Розвиток даного напрямку сьогодні вимагає додаткових досліджень, зокрема – досліджень оптимальних фізико-топологічних моделей приладів, на основі адекватних фізико-математичних моделей елементарних процесів, які забезпечують роботу пристрою.

### РОЗДІЛ 3

## ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ВАКУУМНОМУ ВИПАРНИКУ З КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Важливою складовою технологічних процесів виробництва електронної техніки є нанесення тонких шарів матеріалів на підкладки, тому питанням створення обладнання для виконання цих операцій приділяється велика увага. Незважаючи на успіхи різноманітні пристрої не завжди відповідають вимогам щодо мінімізації впровадження в шари осадження чужорідних атомів робочих газів або мікрочастинок (мікрокрапель), а також усунення радіаційного високоенергетичного впливу на створювану наноструктуру. Багато проблем можуть бути вирішені при реалізації процесів осадження за допомогою випарників з індукційним нагріванням [147].

Вакуумні випарники використовуються для отримання парових потоків різних речовин у вакуумі або в газовому середовищі з метою осадження тонких плівок на підкладках [146,147], створення нанорозмірних дисперсних матеріалів, кластерів і фулеренів [148], для прямого осадження наноструктур з використанням атомної оптики [149,150], для створення активних середовищ атомних лазерів [151]. До переваг вакуумних випарників слід віднести те, що вони можуть здійснювати випаровування без генерації електронів, іонів і плазми і мати дуже низький енергетичний вплив (0,1 еВ) на підкладку або, навпаки, реалізувати процес з генерацією заряджених частинок і плазми. Причому можна отримувати іони і плазму тільки речовини, яка випаровується і здійснювати високоенергетичний вплив на конденсат власними іонами [152]. Останнє усуває необхідність застосування інертних або інших робочих газів і їх потрапляння до тонких плівок, гарантуючи тим самим високу їх чистоту і досконалість мікроструктури.

Незважаючи на перспективність випаровування з ВЧ нагріванням, його використання розвинене недостатньо через відсутність методик розрахунку і конструювання таких випарників: не оптимізована їх конструкція. Без використання концентратора у конструкції не вдається вирішити проблему



електричних розрядів на витки індуктора при випаровуванні матеріалів, які змочують стінки тигля і перетікають на його неробочу сторону. З іншого боку, не вирішена задача мінімізації напруги на індукторі, при якій забезпечується ефективна іонізація парового потоку.

Пошук конструктивних рішень призвів до створення випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, який об'єднує в собі індуктор і ВЧ трансформатор - індукційний випарник з концентратором магнітного поля [146].

Для застосування в кожній технології на конструкцію випарника накладається ряд унікальних обмежень і вимог щодо характеристик парового потоку. Існує потреба в ефективній оцінці різних конструкцій випарників під певні задачі. З огляду на комплексність фізичних задач, які доводиться вирішувати при розробці технологічного обладнання, найбільш доцільно проводити їх дослідження з використанням фізико-топологічних моделей. Як відзначалося, сучасні комп'ютерні засоби та пакети програм дозволяють моделювати електрофізичні, теплофізичні, деформаційні, емісійні, електророзрядні і інші процеси з урахуванням взаємного впливу між ними при роботі приладу.

### 3.1 Конструкція індукційного випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля

Конструкція випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного приведена на рис.2.2,б. Випарник включає індуктор 1, який являє собою котушку індуктивності виготовлену з семи повних витків мідної трубки. Індуктор охоплює концентратор 2, який являє собою монолітне циліндричне кільце з розрізом вздовж радіальної площини. Концентратор виготовлений з порожниною всередині для протікання охолоджуючої рідини. Всередині концентратора розміщується тигель 3 із завантаженням 4. Всі компоненти розміщуються на одній осі і мають між собою найменші з можливих проміжки.

Радіальний розріз в концентраторі має ширину 2 мм і його стінки по суті є лінією передачі, яка з'єднує зовнішню циліндричну поверхню концентратора з його внутрішньою циліндричною поверхнею.

Зазвичай тигель розміщується на теплорезистивних стійках 5 для зменшення тепловідведення від тигля.

Індуктор приєднується до джерела електроживлення і води охолодження через різьбове з'єднання накидними гайками з вакуумним ущільненням (рис.2.2, а).

На рис.3.1 показана тривимірна комп'ютерна модель конструкції випарника з концентратором, в якій індуктор 1 і концентратор 2 не мають електричного з'єднання (розімкнуті).

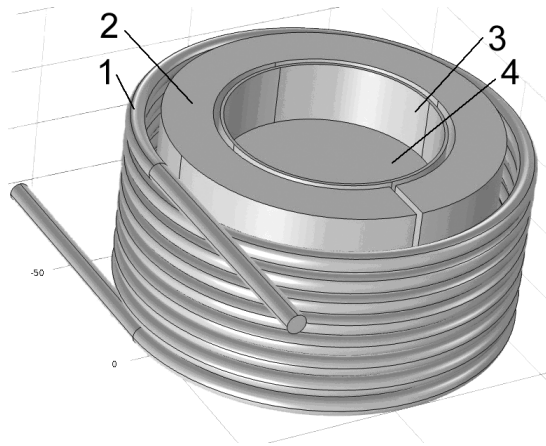


Рис.3.1. Комп'ютерна модель випарника з концентратором електромагнітного поля: 1 - індуктор; 2 - концентратор; 3 - тигель; 4 - завантаження

В іншій модифікації випарника з концентратором, показаному на рис.3.2, індуктор 1 електрично з'єднаний з концентратором 2 у верхній його частині поблизу радіального розрізу 6. Електричний вивід 5 приєднаний до другого кінця витка концентратора 2 знизу. При цій модифікації випарника можливі два варіанти електричного з'єднання індуктора та концентратора, які умовно можна назвати погодженим (рис.3.2,а) та зустрічним (рис.3.2, б), відповідно до напрямків струму у індукторі і тиглі. Різні варіанти електричного з'єднання компонентів забезпечують різні імпеданси та структуру електромагнітні поля випарника, тобто розширюють експлуатаційні можливості використання випарника.

При обох типах з'єднання індуктора з концентратором ефективно вирішується задача узгодження імпедансів низькорезистивного навантаження і джерела (ВЧ генератора) для ефективної передачі електричної потужності до тигля з завантаженням. В цьому випадку, індуктор і концентратор утворюють узгоджувальний понижуючий автотрансформатор.

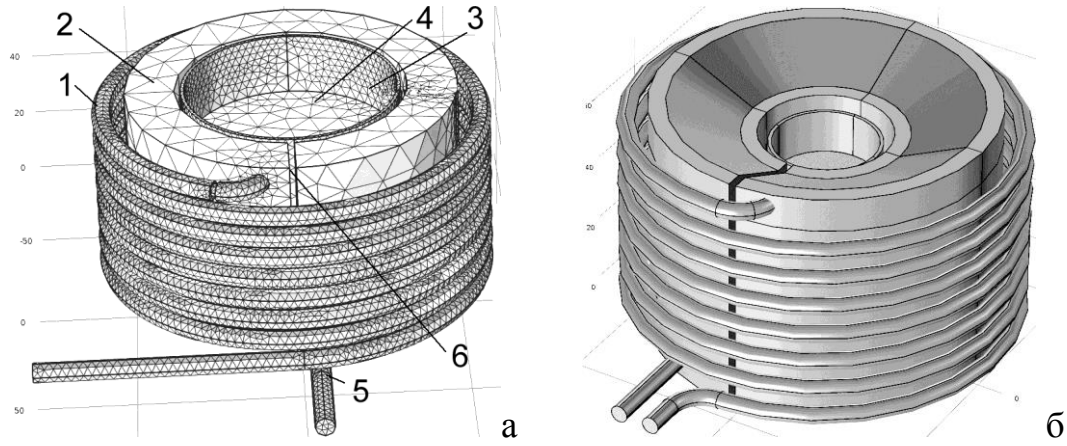


Рис.3.2. Комп'ютерна модель випарника з концентратором магнітного поля при автотрансформаторному погодженому (а) і зустрічному (б) з'єднанні індуктора та концентратора: 1 - індуктор; 2 - концентратор; 3 - тигель; 4 - завантаження; 5 - електричний вивід; 6 - радіальний переріз концентратора (а – зображена розрахункова сітка кінцевих компонентів)

При різних конструкціях випарника електричні струми протікають по різних електричним ланцюгам і збуджують різну конфігурацію магнітного поля і струмів, індукованих у всіх компонентах випарника. Це призводить до перерозподілу структури магнітного та електричного полів в просторі випарника, і джерел тепла, яке виділяється в компонентах випарника

Розміри компонентів випарника істотно впливають на розподіл струмів в компонентах і на температурне поле в тиглі із завантаженням, яке, в свою чергу, визначає експлуатаційні характеристики випарника.

### 3.2. Постановка задачі моделювання випарника

Метою моделювання є побудова фізико-топологічної моделі випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля і дослідження на їх основі залежності експлуатаційних характеристик випарника від його конструктивних параметрів і режимів електричного живлення.

Найбільш загальний параметр вакуумних випарників – це швидкість випаровування матеріалу завантаження, яка визначається температурою завантаження в тиглі і площею поверхні випаровування. Температура

випаровування визначається типом матеріалу, паровий потік якого необхідно отримати, і, відповідно до потреб вакуумно-плазмових технологій, повинна забезпечувати тиск насичених парів  $p^*$  на рівні 1,333 Па. Робоча температура визначає магнітні, електричні, теплофізичні і емісійні властивості компонентів випарника, а вони в свою чергу визначають розподіл і величину струмів і температури в них. Тим самим, на першому етапі дослідження необхідно вирішити комбіновану термоелектричну задачу – дві пов'язані задачі: пряму задачу знаходження ВЧ струмів в компонентах випарника по заданій напрузі живлення на індукторі і зворотну задачу знаходження струмів, які забезпечують задану технологічними вимогами температуру поверхні випаровування.

Пряма задача включає визначення розподілу ВЧ струмів в індукторі, концентраторі, тиглі і завантаженні, які індукуються стороннім ВЧ струмом індуктора від джерела. Електричний струм є джерелом тепловиділення у компонентах випарника відповідно до закону Джоуля і, поряд з втратами на випромінювання і випаровування, визначає температурне поле в них. Фізико-математична модель визначення поля струмів у компонентах випарника описана у пп.2.3.2 даного дослідження.

Зворотна задача знаходження температурного поля у тиглі з завантаженням для вибраної конструкції випарника і заданому електричному режимі: частоті і величині електричної напруги живлення. Температурне поле визначається за фізико-математичної моделлю, яка описана у пп.2.3.3 даного дослідження.

Наступним етапом моделювання є визначення параметрів парового потоку. Структуру парового потоку з тигля визначає його конструкція, а густина потоку визначається швидкістю випаровування, тобто температурою поверхні завантаження. Фізико-математична модель парового потоку описана у пп.2.3.5 даного дослідження. Треба додати, що випаровування у вакуумі утворює вільний молекулярний потік, тобто парові молекули не взаємодіють одна з одною – розсіяння молекул не відбувається. У пп.2.3.5 також розглянуті всі початкові умови дослідження.

Для побудови фізико-математичної моделі іонізації парового потоку необхідно встановити параметри потоку електронів, які емітують з нагрітих

поверхонь внаслідок термоелектронної емісії, та прискорюються електричним полем в оточені випарника. Фізико-математична модель емісії електронів розглянута в пп.2.3.8, а параметри потоку електронів досліджуються при розрахунку їх траєкторій (пп.2.3.9). Фізико-математичні моделі електричного та магнітного полів описані в пп.2.3.7 та пп.2.3.2 відповідно. І в пп.2.3.10 описана фізико-математична модель процесів іонізації.

### 3.3 Фізико-топологічна модель випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля

У відповідності до ієрархії процесів складається фізико-топологічна модель випарника, яка встановлює послідовність розрахунків за фізико-математичними моделями процесів та зв'язок між результатами розрахунків і початковими умовами наступного процесу. Фізико-топологічна модель випарника представлена на рис.2.3. Під рисунком наведені графічні позначення компонентів моделі. Лінії на схемі моделі відображають алгоритмом послідовності дій за моделлю, які виконуються зверху – до низу. Стрілками позначено зворотній зв'язок в моделі для забезпечення зміни початкових умов при оптимізації конструкції і електричних режимів роботи випарника.

Перший етап моделювання складається в побудові моделі обраної конструкції випарника. Моделювання конструкції полягає у побудові компонентів приладу і визначенню фізичних властивостей компонентів відповідно до фізики процесу, який досліджується. Відповідно до першої фізико-математичної моделі необхідно визначити електромагнітні властивості компонентів в при робочій температурі: щільність  $\rho = f(T)$ , питома електропровідність  $\sigma(T)$ , магнітна проникність  $\mu(T)$  і її залежність від напруженості магнітного поля  $H$  в разі магнітного завантаження  $\mu(T, H)$ , питома теплоємність  $c(T)$ , теплопровідність  $\lambda(T)$ , коефіцієнти тепловіддачі з поверхні завантаження і тигля  $\alpha(T)$ .

На рис.3.3 представлена модель конструкції випарника з означенням геометричних параметрів. Початкові розміри компонентів: діаметр тигля  $D_T = 30$  мм, висота тигля  $H_T = 40$  мм, діаметр завантаження  $D_3 = 26$  мм, внутрішній діаметр

концентратора  $D_{K2} = 34$  мм, зовнішній  $D_{K1} = 102$  мм, висота концентратора  $H_K = 80$  мм, діаметр індуктора  $D_i = 112$  мм, висота індуктора  $H_i = 70$  мм, діаметр провідника індуктора – 7 мм, кількість витків індуктора – 8.

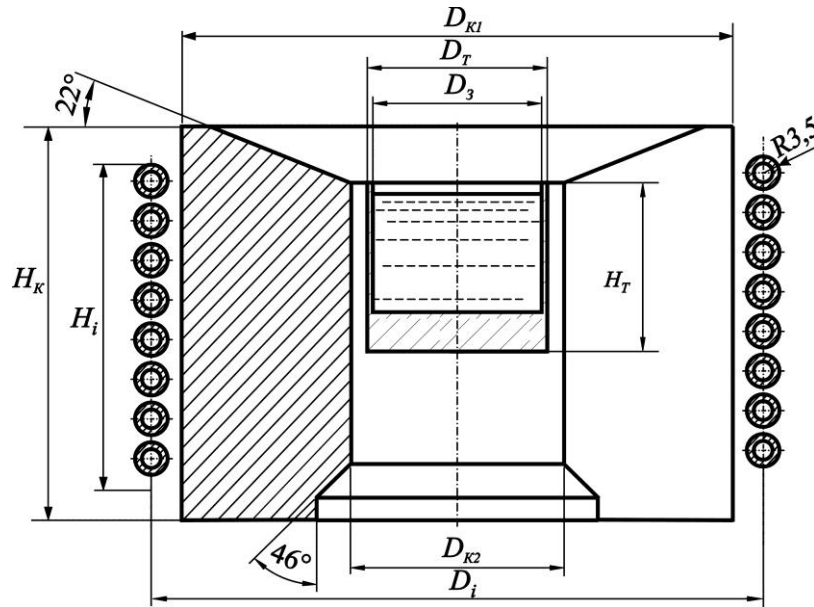


Рис.3.3 Параметри моделі конструкції випарника

Для розрахунків визначені електромагнітні та теплофізичні характеристики компонентів при температурі випаровування завантаження і задані початкові умови (струм індуктора і його частоту). У табл.3.1 наведені дані, а в табл.3.2 початкові умови, для представлених нижче результатів розрахунку.

Таблиця 3.1. Фізичні характеристики компонентів випарника

Характеристика компонентів	Позначення	Величина	Примітки
Електропровідність індуктора, см / м	$\sigma_i$	59453000	мідь при 20°C
Електропровідність завантаження, см/м	$\sigma_3$	4374453	мідь при 1545°C
		3046737	алюміній при 1480°C
Електропровідність тигля, см/м	$\sigma_T$	2420350	молібден при 1545°C
		0,0001	TiB <sub>2</sub> +TiC при 1480 °C
Магнітна проникність індуктора	$\mu_i$	1	відносна
Магнітна проникність тигля	$\mu_T$	1	відносна
Магнітна проникність завантаження	$\mu_3$	1	відносна

Таблиця 3.2. Початкові умови дослідження

Параметри	Позначення	Величина
Напруга індуктора, В	$U_i$	100
Частота струму індуктора, Гц	$f_i$	440000

Дослідження передбачає наступний ітераційний алгоритм пошуку рішення задачі. Спочатку вирішується задача визначення структури електромагнітного поля в просторі випарника і розподіл струмів в електропровідних компонентах при заданій частоті і величині напруги на індукторі. Розподіл струмів визначається з урахуванням скін-ефекту у провідниках індуктивного зв'язку між всіма струмопровідними компонентами випарника. Розподіл струмів дозволяє визначити розподіл джерел тепла в компонентах за допомогою закону Джоуля-Ленца. Надалі, при вирішенні рівняння теплопровідності вирішується задача знаходження температурного поля в тиглі з завантаженням, і визначається температура поверхні випаровування завантаження. Якщо обчислена температура середини поверхні завантаження не збігається із заданою, розрахунок повторюється заново при відкоригованій величині напруги на індукторі або її частоті.

З результатом вірного розрахунку, коли температура поверхні завантаження відповідає заданій, встановлюється також структура магнітного і електричного полів, тобто розподіли напруженості в просторі випарника. Ці дані в подальшому використовуються для розрахунку умов виникнення іонів в паровому потоці матеріалу завантаження.

### 3.4 Розрахунок поля струмів у компонентах випарника

На рис.3.4 показаний графік розподілу струмів в компонентах випарника при розімкнутому індукторі і концентраторі (див. рис.3.1). Показаний розподіл струму визначений уздовж радіальної лінії в середній частині випарника при частоті 440 кГц. Теоретично всі криві повинні представляти експоненти з амплітудою на поверхні компонентів і монотонно спадати від поверхні провідника. Відхилення від експонент пов'язано з обмеженою точністю розрахунку (малою кількістю вузлів) через обмеження обчислювальної потужності комп'ютера. Але можна стверджувати, що співвідношення між розрахованими величинами струмів у компонентах відповідають дійсності. Сума струму в тиглі і на внутрішній поверхні концентратора (площі обмежені графіками) теоретично рівні струму на зовнішній поверхні концентратора (рис.3.4). Розрахунки підтверджують цей факт.

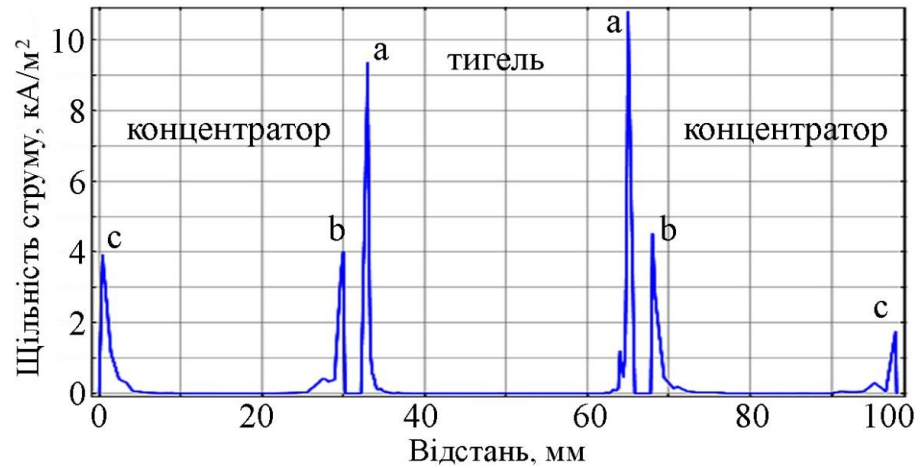


Рис.3.4 Розподіл струму в компонентах випарника: а - поверхня тигля, b - внутрішня поверхня концентратора, с - зовнішня поверхня концентратора (розрахункова сітка - 450 тисяч вузлів)

Як видно з графіка, розподіл струму на поверхнях тигля та концентратора не симетричний відносно осі. Треба врахувати, що густина струму також змінюється вздовж кола циліндричних поверхонь і вздовж осової координати  $z$ . Можна стверджувати, що хоча графіки не змінюються монотонно за експонентою, та їх співвідношення адекватно відображає розподіл струму в компонентах випарника.

На рис.3.5 приведено приклад розрахунку струму в стінці тигля з більш густою сіткою для двох варіантів автотрансформаторного з'єднання індуктора та концентратора. Розподілі струму при більш густій розрахунковій сітці значно ближче до експоненти. При зустрічному з'єднанні у випарнику струм в стінці тигля більший ніж при погодженому.

Розподіли струму для трьох варіантів з'єднання індуктора з концентратором отримані при частоті напруги живлення 440 кГц і амплітудному значенні 100В. З рисунків спостерігається залежність струму від типу з'єднання. Найбільший струм спостерігається при автотрансформаторному зустрічному з'єднанні котушок (індуктора і концентратора). Сам цей факт може бути важливим для дослідження енергетичної ефективності випарника, але не є визначальним для оцінки якості випарника.

Площа фігури, яка обмежена експонентою розподілу струму, є струмом через компонент. Зі зростанням частоти живлення струм в компонентах спадає. Залежність струму в компонентах випарника від частоти представлена графіками



на рис.3.6. Обчислення струму необхідне для визначення електричних втрат і їх впливу на енергетичну ефективність випарника.

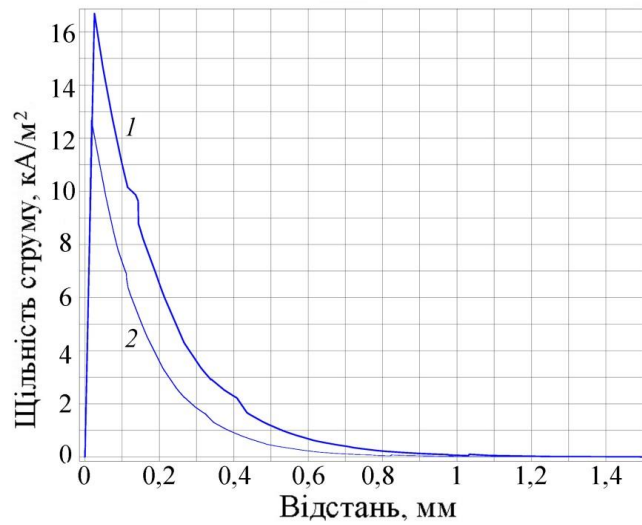


Рис.3.5 Розподіл струму в стінці молибденового тигля при зустрічному 1 та погодженому 2 з'єднанні індуктора і концентратора (розрахункова сітка - 720 тисяч вузлів)

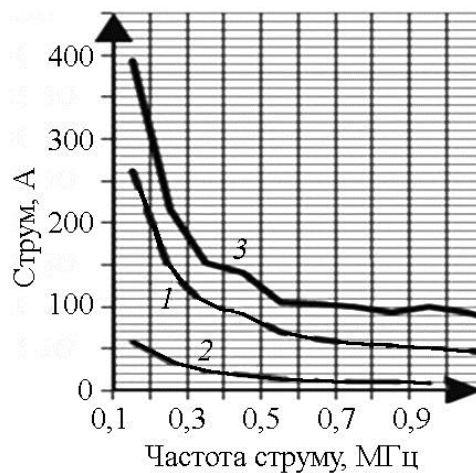


Рис.3.6. Залежність струму в компонентах випарника від частоти: 1 - поверхня тигля, 2 - внутрішня поверхня концентратора, 3 - зовнішня поверхня концентратора

Розподіл струму визначає розподіл джерел тепла за законом Джоуля-Ленца, який використовується при рішенні за моделлю теплообміну у компонентах випарника.

Розподіл струму в компонентах випарника визначає розподіл напруженості магнітного поля в просторі випарника. Приклад розрахованого розподілу напруженості магнітного поля в площині симетрії концентратора електромагнітної

енергії представлений на рис.3.7 у вигляді кольорової карти. Карти дозволяють наочно оцінити вплив конструктивних параметрів на розподіл поля і області локалізації найбільшої напруженості. Сімейство ліній на рис.3.7 представляють лінії однакового магнітного потоку. Аналіз характеристик поля проводився уздовж перетинів в просторі концентратора, а параметри визначалися в межах обраного контуру.

Граничними умовами задавався нульовий магнітний потенціал на границі розрахункової області.

На рис.3.8 представлені графіки зміни напруженості магнітного поля уздовж радіуса в просторі концентратора. Для наочності відлік проводиться від внутрішньої стінки концентратора до його осі. Значення координати  $z$  на графіках виражені в мм і відраховуються від верхнього краю внутрішньої стінки концентратора (див. рис.3.7).

Розрахунок залежності розподілу напруженості магнітного поля від внутрішнього діаметру концентратора виконувався при однаковому зовнішньому діаметрі концентратора і інших початкових умовах. Результати розрахунків показують зростання напруженості магнітного поля при зменшенні внутрішнього діаметра концентратора, що відповідає фізичній суті процесу концентрації електромагнітного поля. Найбільша неоднорідність магнітного поля спостерігається біля стінок концентратора, де сприяє зростанню ймовірності іонізації парових молекул.

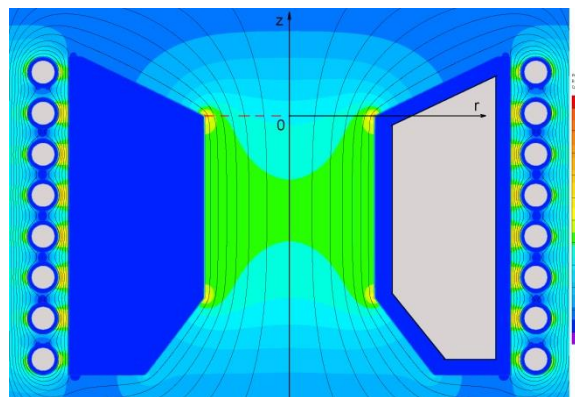


Рис.3.7 Кольорова карта напруженості магнітного поля в площині симетрії випарник (внутрішній діаметр 30 мм)

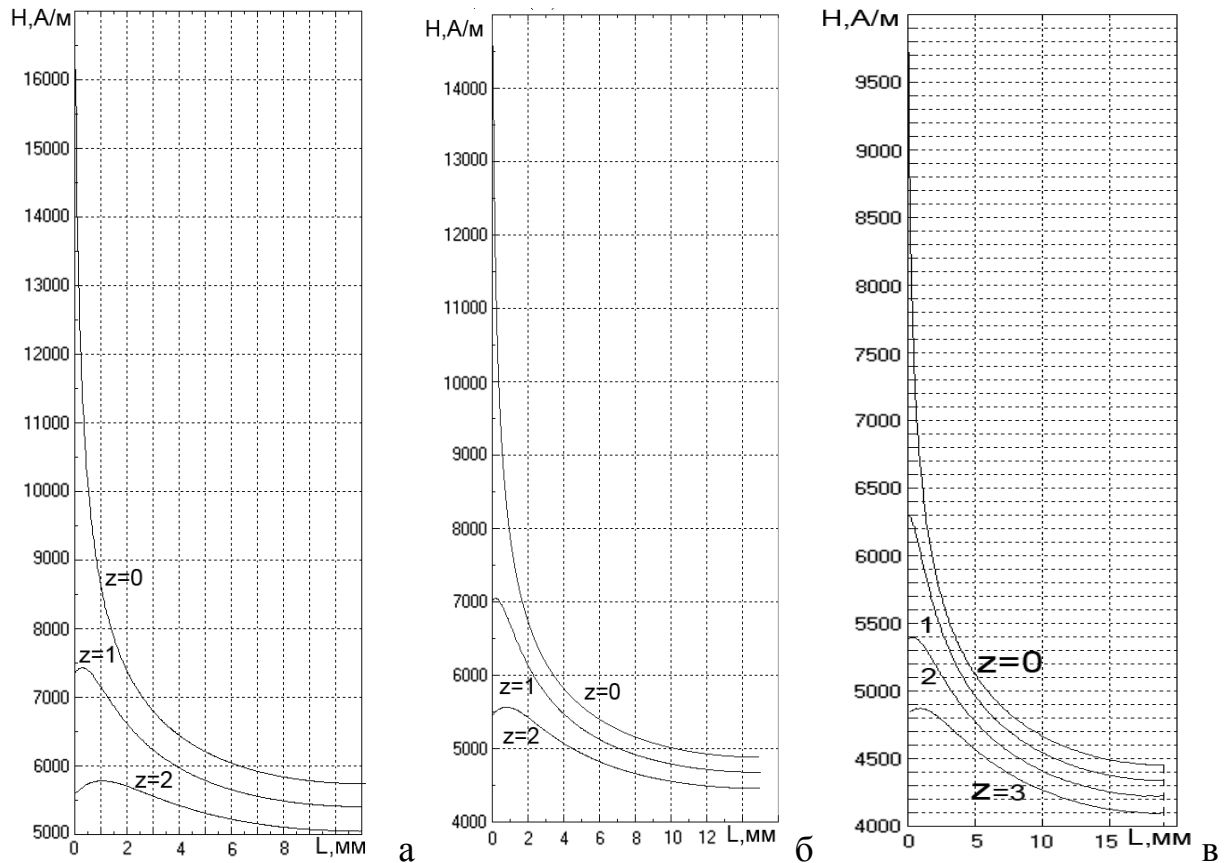


Рис.3.8 Залежність напруженості магнітного поля уздовж радіальних ліній на різних відстані від верхнього краю тигля для концентраторів з різним внутрішнім діаметром: а – 22 мм, б – 30 мм, в – 38 мм.

### 3.5 Розрахунок температурного поля в тиглі з завантаженням

Для розрахунків температурного поля в завантаженні використовувалися теплофізичні характеристики матеріалів, які наведені в табл.3.3. Індуктор і концентратор випарника в робочому режимі охолоджуються водою з загального контуру забезпечення водою. Їх температура визначається швидкістю протікання води по цим компонентам, температурою води на вході та особливостями відбору теплоти водою. Рішення цієї задачі не впливає на результати дослідження і не мають сенсу. Тому в для знаходження рішень за моделлю теплообміну приймалася температура індуктора і концентратора рівною 325 К, що відповідає дослідним спостереженням.

Таблиця 3.3. Фізичні параметри деталей випарника [123]

Компонент	Індуктор, концентратор	Тигель	завантаження
Матеріал	мідь	молібден	мідь

Температура, К	325	1545	1545
Щільність, кг/м <sup>3</sup>		9,974	7,965
Теплоємність, Дж/(кг·К)		332	514
Теплопровідність, Вт/(м·К)		96,6	181,5
Ступінь чорноти	0,5	0,16 [128]	0,13 [126]
Тепловий потік, Вт/м <sup>2</sup> [8]			5608

На рис.3.9 представлені в якості прикладу карти температурних полів на поверхні випаровування розплаву завантаження при різному внутрішньому діаметрі концентратора і тигля. Зазор між тиглем і концентратором у всіх випадках становить 3 мм. Розрахунок розподілу проводився до випадку коли будь-яка точка поверхні розплаву завантаження досягне значення температури випаровування міді (1545 К). З прикладів розподілу видно, що при менших значеннях діаметру тигля спостерігається порушення симетрії розподілу температури по поверхні. Це пов'язано з впливом розрізу в концентраторі, до якого зміщується середина карти температур. С протилежного боку від розрізу спостерігається більша температурна неоднорідність біля стінки тигля. Це пов'язано з перерозподілом струму в концентраторі. Біля стінок розрізу щільність струму відносно рівномірна, а біля стінок внутрішнього кільця концентратора струм стягується в локацію тигля. Найбільша густина струму у внутрішньому кільці концентратора спостерігається саме напроти розрізу. Чим менше діаметр тигля, тим сильніша неоднорідність густини струму по осевій координаті в стінці, і тим сильніше порушення симетрії температурного поля в тиглі.

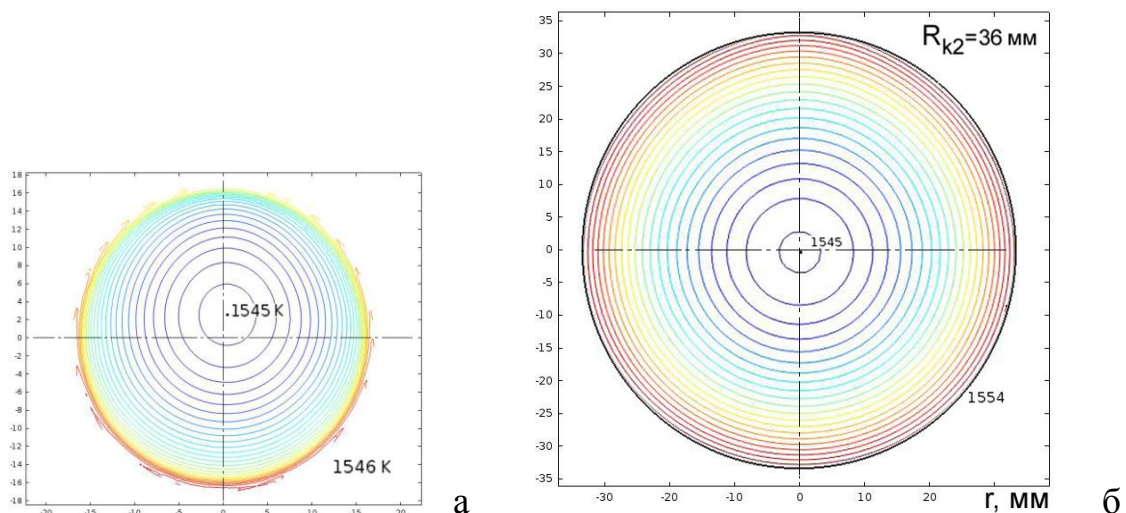


Рис.3.9 Температурні поля на поверхні розплаву завантаження в тиглі при різних внутрішніх радіусах концентратора: а – 24 мм, б – 36 мм

(крок між ізотермами – 1 К)

На рис.3.10 наведені графіки розподілу температури на поверхні розплаву завантаження вздовж радіальної лінії при різних діаметрах тигля. Графіки побудовано від точки з температурою 1545 К до точки на стінці тигля з найбільшою температурою. Представлені графіки відображають аналіз проведений для автотрансформаторного погодженого з'єднання індуктора з концентратором. При інших типах з'єднання спостерігається такі самі залежності. Відмінність спостерігається тільки в енергетичних параметрах випарника.

Графіки на рис.3.10 також підтверджують адекватність розрахунків фізичній сутності явищ теплопередачі. Найбільший перепад температур при діаметрі тигля 66 м становить 9 К. Відносно середньої температури на поверхні розплаву – 1550 К, неоднорідність температури становить  $\sim 0,6\%$ . Неоднорідність температури на поверхні тигля з розплавом завантаження враховувалася при встановленні теплових потоків з їх поверхні. Але в розрахунках розподілу парового потоку і емісії електронів з поверхні розплаву можна вважати температурне поле на поверхні ізотропним.

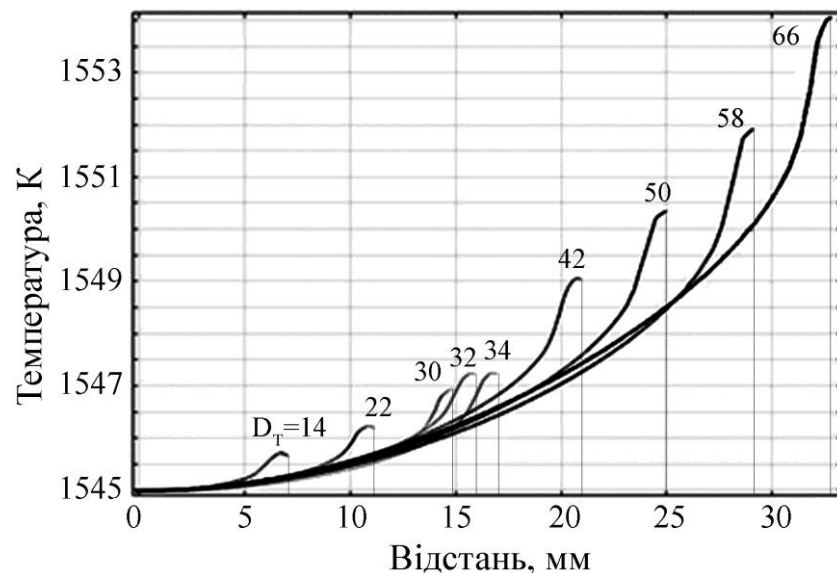


Рис.3.10 Графіки розподілу температури уздовж радіальної лінії на поверхні випаровування при різних діаметрах тигля

На рис.3.11 представлені розраховані ізотерми в осьовому перерізі тигля із завантаженням при різному положенні тигля в концентраторі.

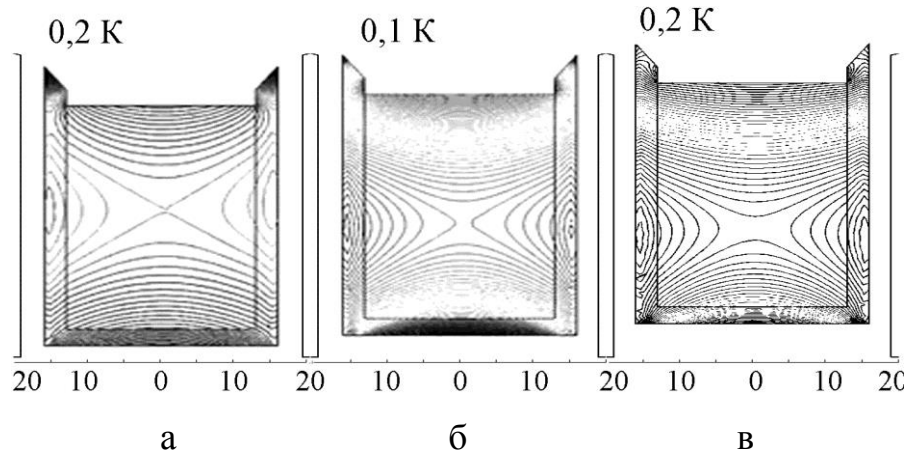


Рис.3.11 Ізотерми в осьовому перерізі тигля з завантаженням при різному положенні тигля в концентраторі: а – зсув вниз на 2 мм; б – без зсуву; в - зсув вгору на 2 мм (діаметр тигля 30 мм)

Графіки розподілу температури вздовж радіальної лінії на поверхні розплаву для трьох положень тигля в концентраторі наведені на рис.3.12.

Температурні поля (рис.3.11, рис.3.12) отримані для розрахункової температури поверхні розплаву 1545 К і також без урахування конвекційного і електромагнітного перемішування в розплаві завантаження, яке вирівнює температурне поле.

Зсув тигля вниз концентратора відносно верхнього краю внутрішньої поверхні приводить до зростання середньої температури завантаження та перерозподілу температурного поля на поверхні завантаження. При чому, всі інші геометричні параметри залишилися без зміни і напруга на індукторі підтримувалася 273 В при частоті 440 кГц. Але занурення тигля може бути обмежене вимогами технології: паровий потік з тигля може осаджуватися на стінках розрізу у концентраторі і викликати його електричне заколючування.

Максимальний перепад температури відносно робочої температури 1545 К по поверхні розплаву завантаження складає 2,2 К і спостерігається в завантаженні при зсуві тигля вниз щодо краю поверхні концентратора (рис.3.12). Оскільки такий перепад відносно робочої температури складає 0,1% , ще раз переконуємося, що можна в подальших розрахунках вважати температуру поверхні розплаву ізотропною.

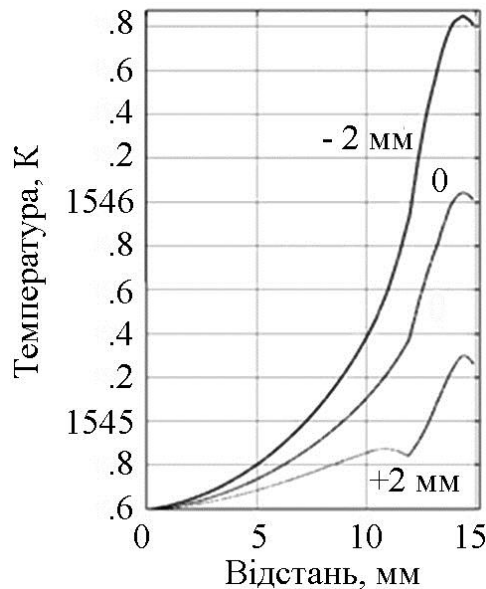


Рис.3.12 Розподіл температури по поверхні розплаву завантаження в залежності від зсуву тигля відносно концентратора (від середини до стінки тигля)

Для забезпечення пересічення графіків в одній точці горизонталі 1545 К, необхідно визначати напругу з точністю – 0,001 В. При цьому обчислювальний ресурс також зростає в сотні разів. Але така точність розрахунків не відповідає можливості контролю напруги з такою точністю на практиці і не збільшує точність обчислень інтегральних параметрів, які істотні для оцінки ефективності випарника.

Розрахунки показали, що градієнт температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму індуктора і становить 2 К (тигель у положенні без зсуву). Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні  $0,0013 \div 0,002$ .

Результати розрахунку температурного поля при різних конструктивних параметрах випарника свідчать про адекватність фізико-топологічної моделі випарника фізичному змісту процесу нагрівання завантаження у випарнику з ВЧ концентрацією електромагнітного поля.

### 3.6 Аналіз енергоефективності випарника

На рис.3.13 показані розраховані графіки залежність напруги на індукторі випарника від частоти для двох конструктивних варіантів випарника – зображених на рис.3.1 (1) і на рис.3.2 (2). Графіки визначені для температури завантаження 1545 К, що відповідає температурі випаровування міді.

Графіки дозволяють визначити переваги конструкцій випарника відповідно до вимог технологічного застосування. Для придушення іонізаційної складової парового потоку необхідно зменшувати напруженість електричного поля над тиглем. Для цього необхідно зменшувати напругу на індукторі. Збільшити напруженість значно простіше – введенням додаткового позитивно зарядженого електроду, який буде виконувати роль аноду і прискорювати електрони в заданому напрямку.

На рис.3.14 наведені графіки залежності потужності, яка виділяється в компонентах концентратора, від радіуса внутрішньої поверхні концентратора. Розрахунок зроблений для температури завантаження тигля 1545 К (випаровування міді). Аналіз графіків показує, що при трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, які виділяється у випарнику на 12,3% більше в трансформаторній схемі. В енергетичному відношенні автотрансформаторний варіант конструкції випарника має переваги.



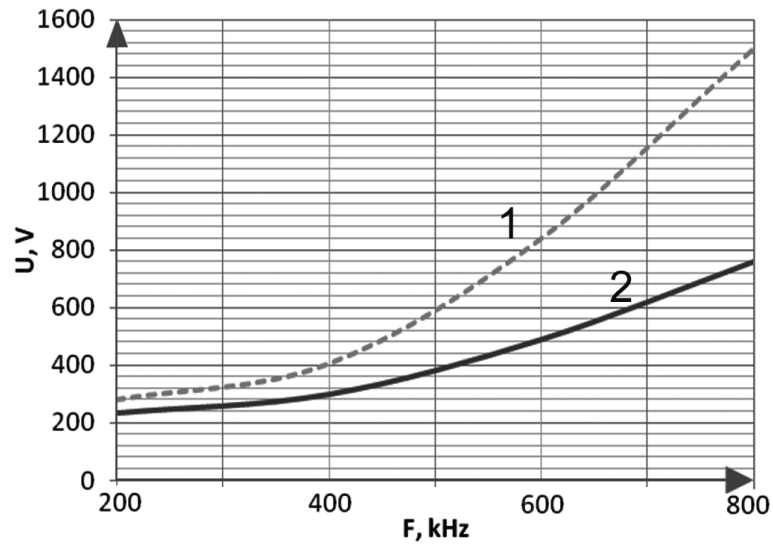


Рис.3.13. Залежність напруги на індукторі від частоти струму індуктора, коли індуктор і концентратор: 1 - роз'єднані, 2 - з'єднані погоджене (для температури поверхні завантаження 1545 K)

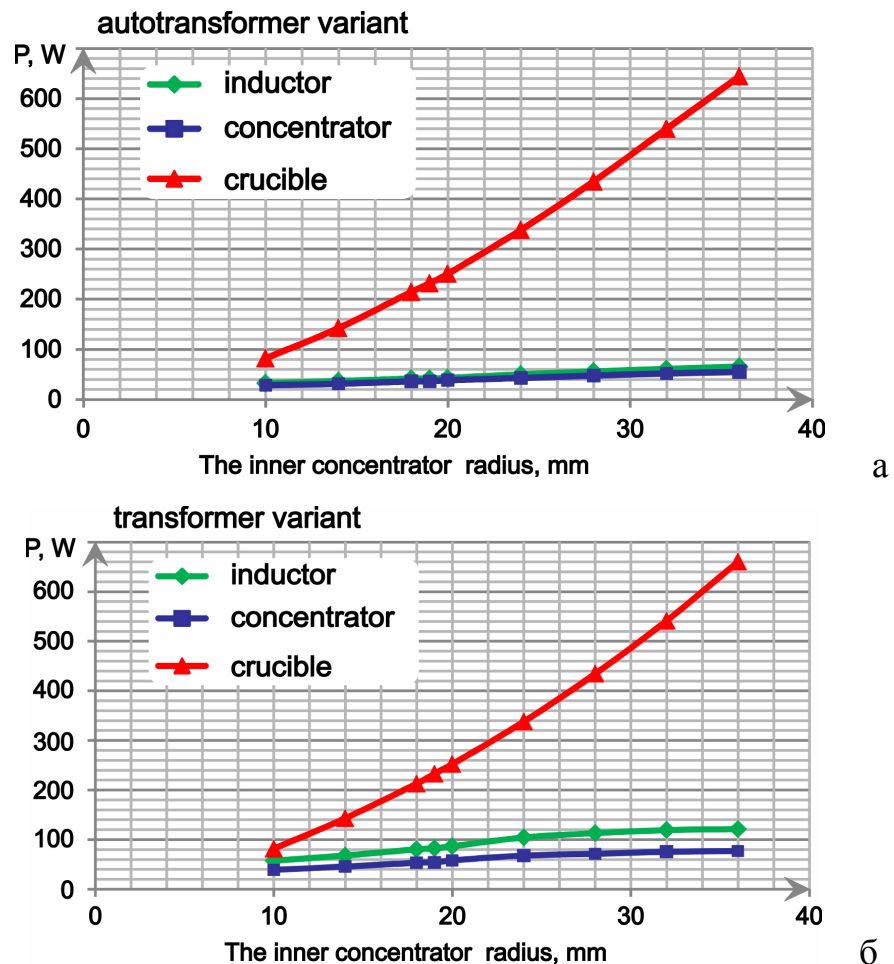


Рис.3.14. Залежність потужності, що виділяється в компонентах концентратора, від радіуса внутрішньої поверхні концентратора для а - роз'єднаних і б - з'єднаних індуктора і концентратора (температура завантаження 1545 K)

### 3.7 Трасування траєкторій електронів

Для трасування траєкторій електронів визначалися розподіл електричного потенціалу та індукції магнітного поля в просторі над тиглем випарника. Картини полів для розрахованої напруги на індукторі 273 В і частоті струму 440 кГц представлені на рис.3.15. Напруга індуктора отримана в результаті розрахунків температурного поля для робочої температури завантаження 1545 К. Тигель в розрахунках знаходився під плаваючим потенціалом, що забезпечує зменшення втрат енергії

На рис.3.16 зображені розраховані траєкторії електронів у електромагнітному полі випарника. Показано 100 траєкторій електронів при 60 нс прискорення у електромагнітному полі випарника. Кольорова шкала відображає енергію електронів на момент завершення розрахунків. З траєкторій видно, що електрони, які емітують з середини розплаву прискорилися до енергії 11,8 еВ. З моменту отримання електронами енергії більшої за енергію іонізації атомів парового потоку (для міді – 7,72 еВ), електрони можуть атоми іонізувати.

З рис.3.16 видно, що на відстані 40÷50 мм над тиглем електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді у власному електричному полі випарника, без впливу зовнішнього електричного поля, на відстані 40÷50 мм.

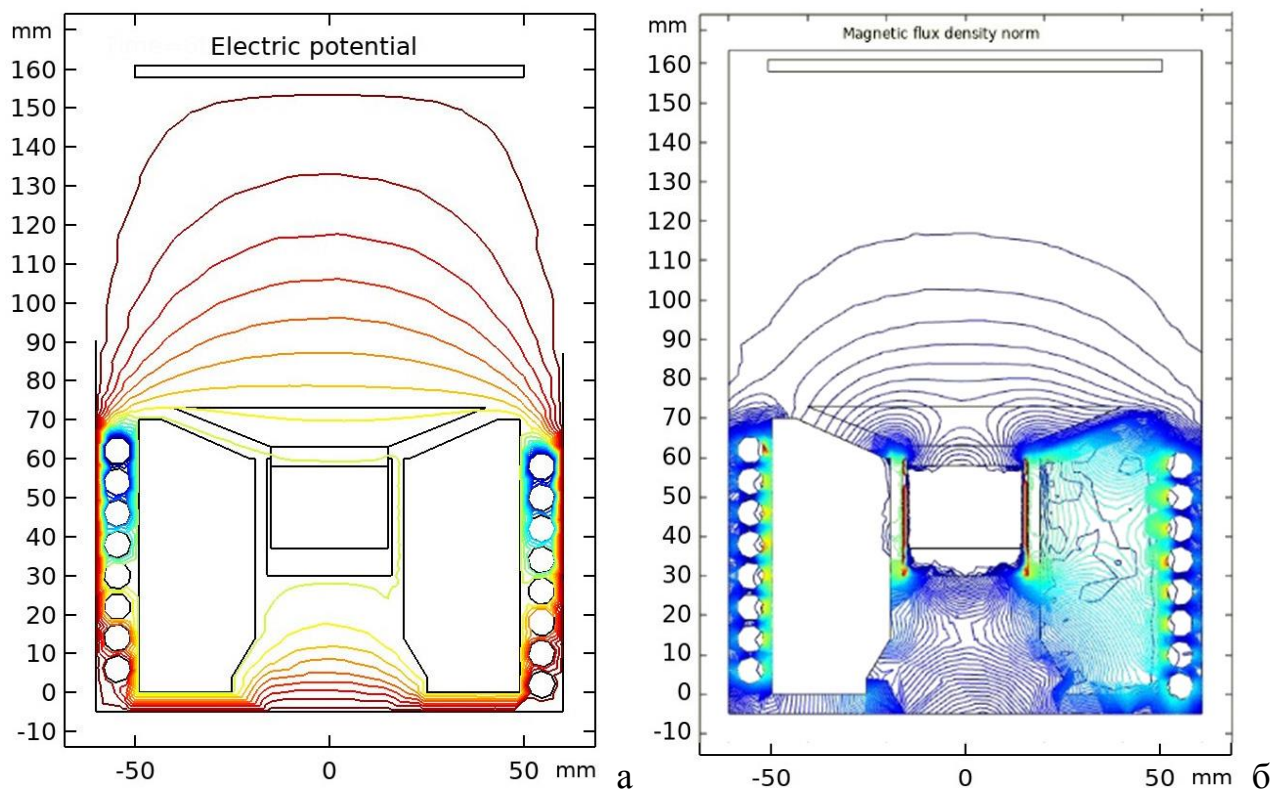


Рис.3.15 Розподіл електричного потенціалу (а) та нормальної складової індукції магнітного поля (б) в просторі над тиглем випарником

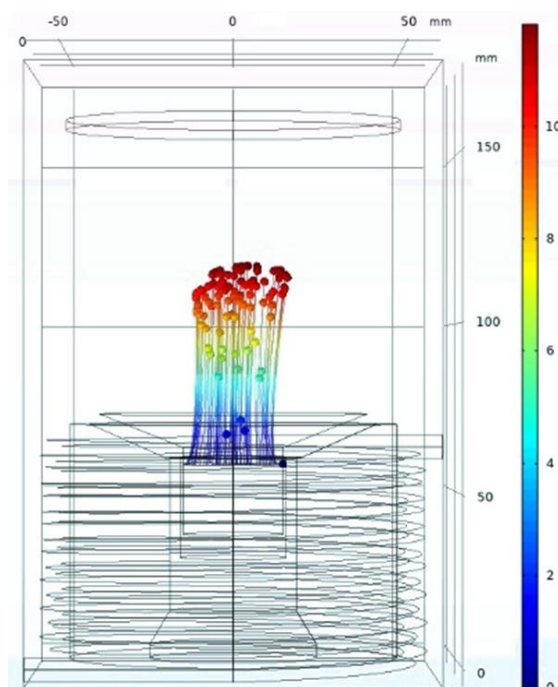


Рис.3.16 Траєкторії і енергія електронів у електромагнітному полі випарника після 60 нс прискорення

### 3.9 Експериментальне дослідження індукції магнітного поля у випарнику

Валідація проводилась порівнянням даних за результатами розрахунків індукції магнітного поля в моделі випарника з ВЧ концентратором електромагнітного поля з даними його вимірювання у дослідного зразка з розмірами відповідними до рис.3.3. Було досліджено розподіл магнітної індукції вздовж вісі Oz та вздовж паралельних їй ліній. Величина магнітної індукції визначається шляхом виміру наведеної ЕРС у детекторі магнітним полем випарника, з подальшим перерахунком до значення магнітної індукції.

Експериментальний макет, представлений на рис.3.17, складався з наступних елементів:

1. Цифровий осцилограф SDS1022DL
2. Джерело живлення УІП-2
3. Конденсатор К75-28 ємністю 100 мкФ  $\pm 10\%$  на напругу 3 кВ.
4. Випарник з ВЧ концентратором електромагнітного поля.
5. Індукційний детектор магнітного потоку.
6. Мультиметр DT-182.
7. Штатив.
8. Вмикач.

Під час дослідження конденсатор розряджався на первинній обмотці випарника (індукторі) з частотою 13,5 кГц. Сигнал з клем конденсатора через щуп подавався на перший канал осцилографа. Сигнал з індукційного детектора подавався на другий канал осцилографа.

Електрична схема підключення елементів дослідницького стенду наведена на рис.3.18.

Отримання даних відбувається у декілька етапів:

1. З джерела живлення УІП-2 подається напруга на конденсатор С, у діапазоні від 0 до 40 вольт. Дана напруга фіксується по вольтметру джерела живлення та більш точно мультиметром DT-182. Саме джерело живлення здатне

видавати напругу до  $\pm 300$  вольт, але максимальна вхідна напруга каналу осцилографа SDS1022DL обмежена лише 40 вольтами.

2. Джерело живлення УТП-2 вимикають і конденсатор  $C$  підключають до кінців індуктора концентратора  $L_{\text{con}}$  за допомогою ключа  $K$ . Після чого фіксуються затухаючі коливання на осцилографі.

3. Тригер осцилографа SDS1022DL спрацьовує по сигналу першого каналу, а записує дані з обох каналів. Одержане зображення зберігається у пам'яті осцилографа.

В результаті вимірювань, отримали дані залежності магнітної індукції вздовж осі випарника і паралельних їй ліній, які представлені на графіках рис.5.19. На рис.5.20 показано положення ліній вимірювання у випарнику та індукцію вздовж них у відносних одиницях.

Спостерігається задовільне спів падіння графіків розподілу індукції магнітного поля. Експериментальні дані відрізняються від розрахункових з похибкою не більше 5%.

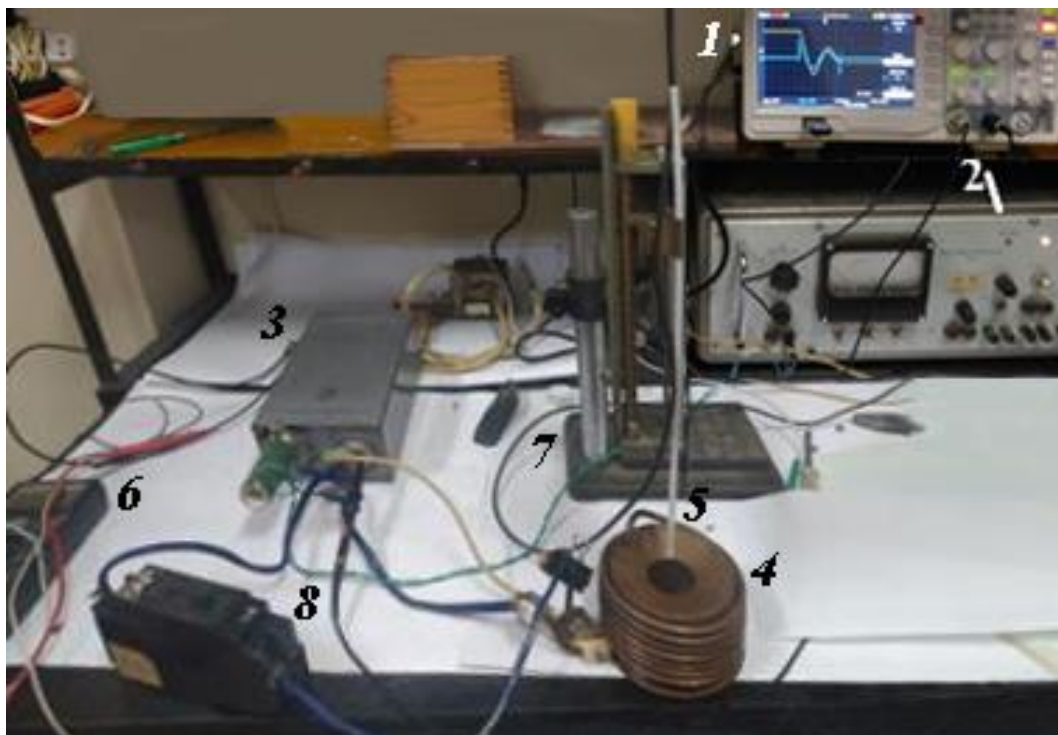


Рис.3.17 Світлина дослідного макету

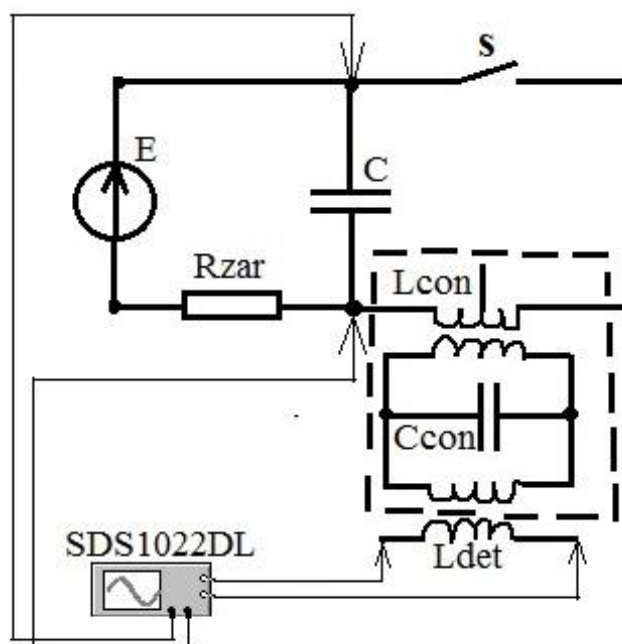
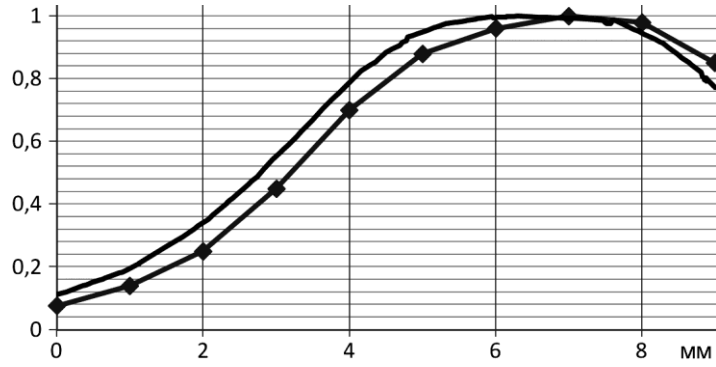
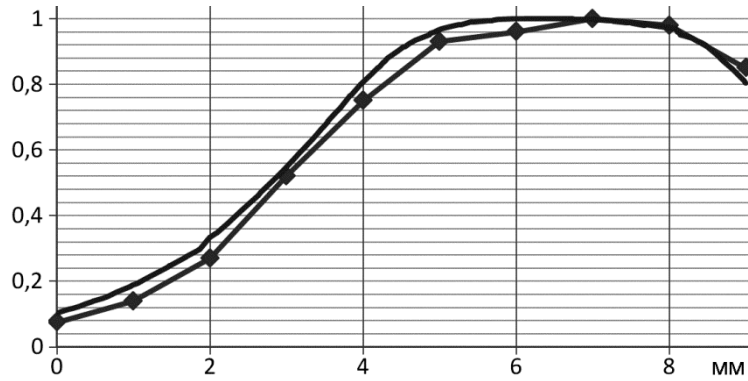


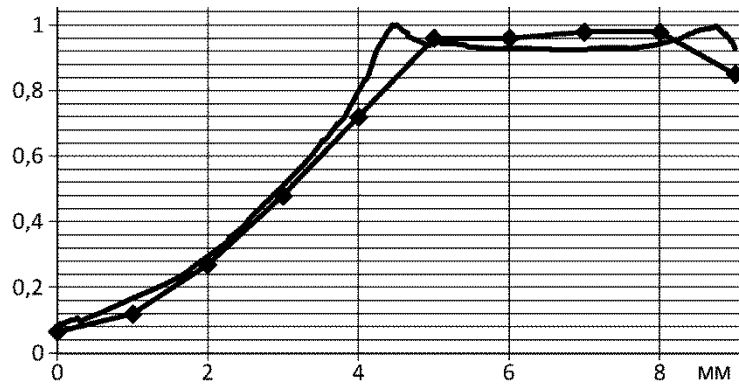
Рис. 3.18. Схема електрична з'єднання елементів дослідного макету:  $E$  – джерело живлення,  $R_{zar}$  – опір ланцюга зарядки конденсатора,  $C$  – конденсатор,  $T$  – комутаційний ключ,  $L_{con}$  – індуктивність концентратора,  $C_{con}$  – ємність концентратора,  $L_{det}$  – індуктивний датчик, SDS1022DL – цифровий осцилограф.



а



б



в

Рис. 3.19 Нормоване значення розрахованої магнітної індукції (суцільні лінії) та нормоване значення ЕРС індукційного датчика (лінії з ромбами): вздовж осі випарника (а), вздовж лінії через 8 мм (б), і через 16 мм (в)

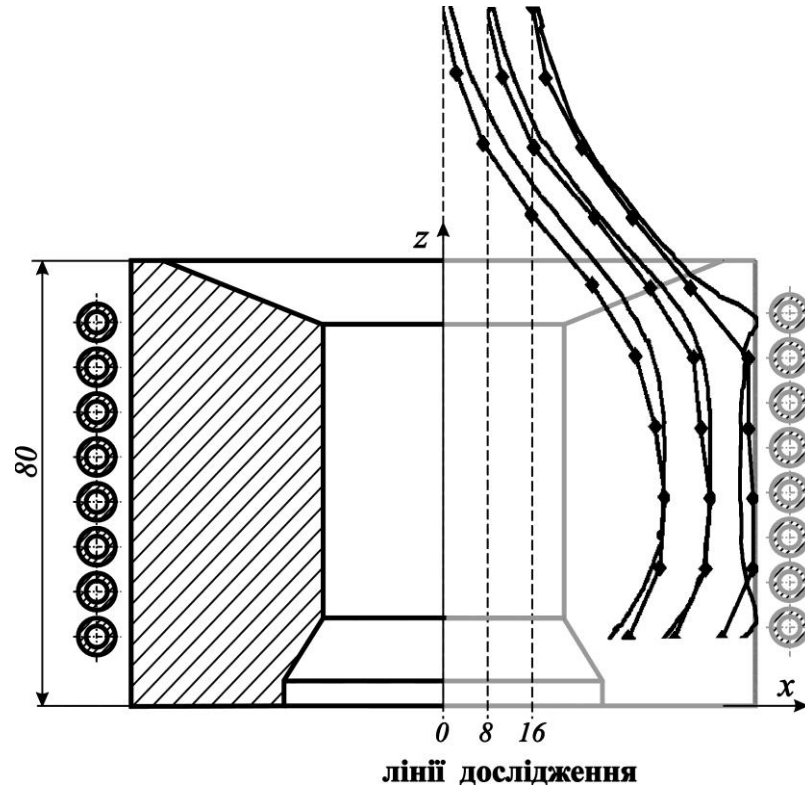


Рис. 3.20 Розміщення ліній дослідження розподілу індукції магнітного поля та нормований розподіл вздовж них

### 3.10 Висновки до розділу

1. Застосована методика фізико-топологічного моделювання до випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, в просторі якого магнітне поле струму індуктора описується рівнянням в приватних похідних щодо комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу. Встановлено тривимірний розподіл індукції магнітного поля, який визначає граничні умови при розрахунку за рівнянням повного струму тривимірного розподілу струму в елементах випарника. За розподілом струму встановлено розподіл джерел тепловиділення, який є граничною умовою при розрахунку нелінійного рівняння теплопровідності для стаціонарної задачі. Розрахований тривимірний розподіл температури в тиглі з завантаженням, з урахуванням теплових потоків через поверхні елементів випарника. На відміну від існуючих, запропонована методика враховує просторовий розподіл фізичних характеристик в елементах випарника у всіх процесах перетворення енергії, що дозволило досягти адекватності моделей в



межах областей їх застосовності і досягти узгодження з експериментальними даними.

2. При автотрансформаторній конструкції випарника з концентрацією електромагнітної енергії розрахована напруга на індукторі, яка при частоті 440 кГц забезпечує робочу температуру випаровування 1545 К (для міді) становить 273 В.

3. На підставі розрахунків за допомогою фізико-математичних моделей для різних конструкцій індукційних випарників вперше встановлено, що у випарнику з ВЧ концентрацією магнітного поля, не залежно від діаметру тигля і його положення в концентраторі, температура на поверхні випаровування може вважатися однаковою з похибкою для подальших розрахунків не більше 0.5 %.

4. Градієнт температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму живлення і становить 2 К. Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні  $0,0013 \div 0,002$ .

5. Вакуумні випарники використовується в стаціонарних температурних умовах. Для дослідження становить інтерес аналіз стаціонарних теплових полів в компонентах випарник при заданій температурі завантаження, яка забезпечує необхідний потік пара.

6. Результати розрахунку температурного поля при різних конструктивних параметрах випарника свідчать про адекватність фізико-топологічної моделі випарника фізичному змісту процесу нагрівання завантаження у випарнику з ВЧ концентрацією електромагнітного поля.

7. При трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, які виділяється у випарнику на 12,3% більше ніж у випарника з трансформаторним з'єднанням індуктора і концентратора.

8. За розподілом напруженості електричного потенціалу та індукції магнітного поля випарника в робочому режимі над тиглем з завантаженням, розраховані траєкторії електронів, які емітують з поверхні розплаву завантаження.

Показано, що на відстані над тиглем випарника  $40\div 50$  мм електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді (потенціал іонізації – 7,72 eV).

## **4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПОТУЖНИХ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДАХ**

Комутаційні прилади постійного струму застосовуються для комутації силових і допоміжних ланцюгів на рухомому складі електрифікованого транспорту, на тягових підстанціях, в високовольтних мережах постійного струму і на промислових установках. Постійно існує необхідність заміни застарілих зразків комутаційних приладів струму з відкритою електричною дугою, створення і впровадження нових перспективних зразків. Нові розробки повинні володіти більш високими технічними характеристиками і екологічною чистотою при одночасному зниженні експлуатаційних витрат. Цим вимогам в повній мірі можуть задовольняти вакуумні комутаційні прилади.

Для відключення потужного струму у вакуумному вимикачі необхідно застосовувати спеціальні заходи. Робота зі створення таких апаратів ведеться в США, Японії, Європі і Росії.

### **4.1 Дослідження відсічки електронів в плоскому діоді магнітним полем плоского індуктора з концентратором**

#### **4.1.1 Ефект відсічення електронів**

Ефект відсічення електронів в схрещених полях, коли магнітне поле ортогональне електричному полю і не дозволяє електронам потрапляти на анод, знаходить застосування в багатьох електронних приладах: магнетронних генераторах НВЧ, магнетронних пристроях для іонного розпилення матеріалів, перетворювачах для вимірювання вакууму, комутуючих приладах (вакуумних вимикачах, газорозрядних приладах магнетронного типу), електронно-променевих приладах. Випадок відсічення електронів в однорідних полях розглянуто в літературі [51]. Однак на практиці найчастіше застосовують неоднорідне магнітне поле, при цьому його генерація здійснюється як постійними магнітами, так і соленоїдами або індукторами [52,54,55,153]. Індуктори застосовують для генерації

імпульсного магнітного поля з метою управління процесами, що відбуваються у вакуумних вимикачах (ВВ), а також в імпульсних газорозрядних приладах і пристроях магнетронного типу [52, 54-57]. Однак за нашими даними ефект відсічення електронів в плоских електродних системах з імпульсним магнітним полем при обліку індукції вихрових струмів в електродах в літературі не вивчався.

На тепер ВВ є затребуваними приладами для сучасної високовольтної силової електротехніки, тому що вони перевершують по масо-габаритним параметрам і експлуатаційними характеристиками високовольтні вимикачі з газовою та масляною ізоляцією [52,54,55,153-158]. Недоліком ВВ є генерація рентгенівського випромінювання, викликаного бомбардуванням електронами контакту з високим позитивним потенціалом. Це випромінювання небезпечне для персоналу і розташованої поруч напівпровідникової апаратури. Електрони з'являються внаслідок автоелектронної емісії [51] з негативного контакту при високій напрузі ( $>10$  кВ) і малій відстані (до декількох міліметрів) між контактами, тобто в період спрацьовування ВВ.

Таким чином, важливою проблемою є мінімізація рентгенівського випромінювання під час спрацьовування ВВ. Вирішити це завдання можна, використовуючи ефект відсічення електронів в схрещених полях, застосовуючи зовнішній індуктор для генерації магнітного поля. Магнітне поле корисно і з точки зору впливу на вакуумний дугового розряд, що виникає у ВВ при розведенні контактів, тому що воно змушує обертатися розрядний стовп, знижуючи тим самим тепловий вплив на контакти і їх ерозію.

У вимикачах часто застосовуються плоскі контакти, і вони в розведеному стані є плоским вакуумний діод, однак відсічення автоемісійних електронів з використанням зовнішнього індуктора, розміщеного з неробочої сторони плоских контактів, в літературі не розглянута [52,54,55,153-158].

Мета роботи – дослідження умов досягнення ефекту відсічення електронів в раніше невивченій діодній системі плоских контактів ВВ з індуктором у вигляді плоскої спіралі. Через труднощі експериментальних дослідження вони виконані шляхом розрахунків на моделі. Для цього розроблена і представлена фізико-топологічна математична модель ВВ з діодною структурою плоских контактів і

проведено чисельне дослідження відсічення струмів автоелектронної емісії в магнітному полі зовнішнього імпульсного індуктора у вигляді плоскої спіралі з урахуванням індукції вихрових струмів в контактах ВВ. Результати моделювання використані для вироблення рекомендацій по конструюванню ВВ.

#### 4.1.2 Фізика процесу відсічення

В ідеальному випадку траєкторія електронів в схрещених полях має форму циклоїди (рис.4.1) [51]. Ефект відсічення полягає в тому, що під дією сили Лоренца електрони відхиляються від напрямку дії силової лінії електричного поля і не потрапляють на анод, тобто в вакуумі припиняється струм на позитивний контакт – анод (рис.4.2а). Для цього індукція магнітного поля  $B$  повинна бути більше деякої критичної величини  $B_{кр}$  (рис.4.2б).

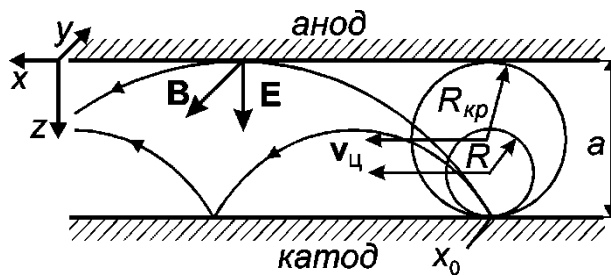


Рис. 4.1 Циклоїдний рух електрона в схрещених електричному і магнітному полях.

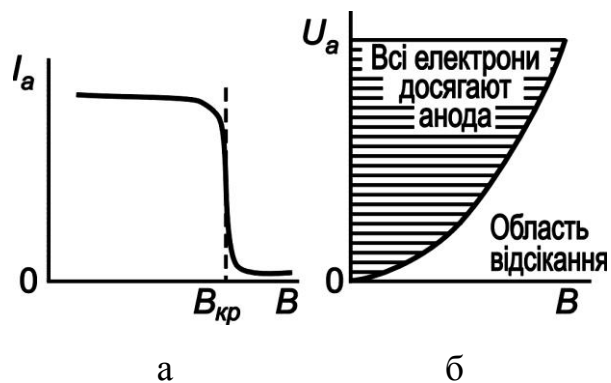


Рис. 4.2 Відсічення струму в схрещених полях (а) і параболу критичного режиму (б)

Таким чином, висота циклоїди в режимі відсічення менше відстані  $d$  між електродами. При  $B = B_{кр}$  висота циклоїди і діаметр кола, що утворює циклоїду,  $2R_{кр}$  рівні  $d$ . Звідси:

$$B_{\text{кр}} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2m}{e}} U. \quad (4.1)$$

де  $m$  і  $e$  – маса і заряд електрона,  $U$  – напруга на електродах. В подальшому (4.1) буде використовуватися для верифікації чисельних розрахунків.

#### 4.1.3 Конструкція вимикача

На рис.4.3 приведена спрощена діодна конструкція контактів ВВ з плоским індуктором в розімкненому стані. Для побудови топологічної моделі ВВ вводимо систему геометричних параметрів, представлену в табл.4.1, із позначенням значень, використаних при моделюванні.

Таблиця 4.1 Топологічні параметри ВВ

Параметр	значення	Розмір, мм
Зовнішній діаметр індуктора (плоска спіраль)	$D1$	60
Діаметр верхнього контакту	$D2$	60
Діаметр нижнього контакту	$D3$	60
Внутрішній діаметр індуктора	$d1$	10
Діаметр отвору у верхньому контакті	$d2$	10
Відстань між індуктором і контактом	$\Delta 1$	5
Відстань між контактами	$\Delta 2$	10
Товщина індуктора	$\delta 1$	5
Товщина верхнього контакту	$\delta 2$	5
Товщина нижнього контакту	$\delta 3$	5
Ширина радіальних щілин у верхньому контакті	$\delta 4$	1
Кількість радіальних щілин у верхньому контакті	$N$	$0 \div 8$

У модель були введені такі фізичні параметри: провідність індуктора і контактів з міді; напруга, прикладена до контактів  $U$ ; кількість ампервитків індуктора  $I \cdot W$ ; частота імпульсного струму індуктора  $f = 1, 5, 10$  и  $50$  кГц.

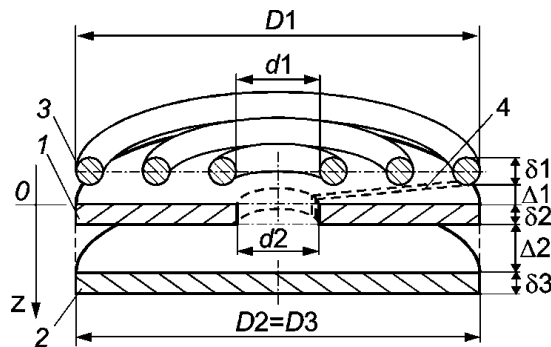


Рис. 4.3 Модель конструкції ВВ з плоскими контактами (1, 2) з плоским індуктором (3): 4 – радіальна щілина у верхньому контакті

#### 4.1.4 Фізико-топологічна математична модель ВВ

Узагальнена структурна схема фізико-топологічної моделі ВВ, розробленої в даній роботі, представлена на рис.4.4. Вона включає частинні моделі для електричного і магнітного полів, модель емісії електронів і кінетичної моделі руху електронів в електромагнітному полі з урахуванням дії сили Лоренца. Розрахунок за математичними моделями здійснювався чисельно МКЕ.

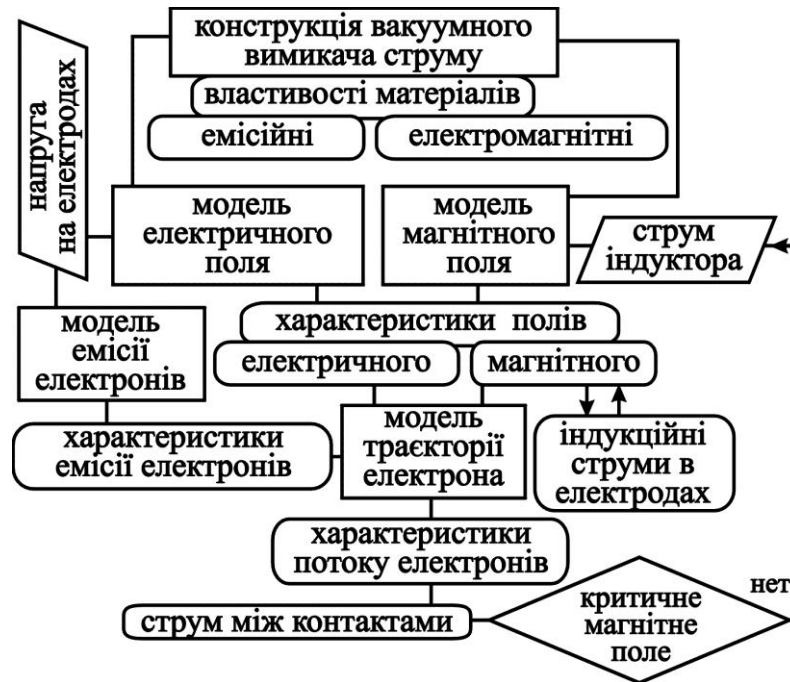


Рис. 4.4 Структура фізико-топологічної математичної моделі ВВ з урахуванням індукції вихрових струмів в контактах

При розрахунках визначалися:

1. Величина і розподіл струмів у контактах і індукторі.
2. Розподіл магнітного поля між контактами ВВ.
3. Розподіл електричного поля між контактами ВВ.
4. Траєкторії електронів, емітованих нижнім контактом.
5. Умови відсікання електронів.

Електромагнітна частина математичної моделі ВВ ґрунтувалася на рівняннях Максвелла для вакуумних та провідних середовищ у ВВ і граничних умовах, адаптованих до нашого випадку (тут і далі використовувалися загальноприйняті позначення векторів [114]):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}; \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho = 0; \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (4.5)$$

У рівнянні (4.2) член  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  не враховувався внаслідок низьких робочих частот (менше 1 МГц), а в рівнянні (4.4) не враховувався просторовий заряд через його не значущу роль при високій напрузі, яка прикладена до контактів.

Система (4.2) – (4.5) доповнювалася матеріальними рівняннями:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (4.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H}; \quad (4.7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (4.8)$$

де  $\varepsilon_0$  – електрична стала,  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму, і  $\sigma$  – електрична провідність матеріалу індуктора і контактів (міді). Вектор електричної поляризації  $\mathbf{P}$  і магнітний вектор  $\mathbf{M}$  приймалися рівними нулю.

При розрахунку магнітного поля враховувалося поле, створюване безпосередньо індуктором, і вторинні магнітні поля, що генеруються індукційними струмами в контактах ( $j_{\text{вихр}}$ ). При цьому струм в індукторі враховувався як сума стороннього струму, збудженого зовнішнім електричним ланцюгом  $j_{\text{стор}}$ , і вихрового струму  $j_{\text{вихр}}$ , індукованого змінним магнітним полем струмів контактів:

$$j = j_{\text{стор}} + j_{\text{вихр}}. \quad (4.9)$$

При вирішенні системи рівнянь Максвелла для різних частин (середовищ) ВВ застосовувалися загальноприйняті граничні умови, які використовуються при розрахунках індукційного нагріву [114]).

Початкова кінетична енергія (швидкість) електрона задавалася рівною нулю. Напрямок вильоту з поверхні нижнього контакту ВВ (емітера) варіювався при розрахунках.

У розрахунках приймалося наступні початкові умови.

Емісія електронів з поверхні катодного (нижнього) контакту задавалася рівномірним розподілом по поверхні контакту деякої кількості точок емісії : 500 або 250.



Кінетична модель руху електронів в електричному і магнітному полях між контактами ВВ заснована на другому законі Ньютона з урахуванням дії сили Лоренца ( $\mathbf{F}$ ) :

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]), \quad (4.10)$$

де  $e$  і  $v$  – заряд і швидкість електрона, відповідно. Кінетична модель використовувалася для розрахунку траєкторії руху електронів і визначення струму індуктора, при якому відбувається відсічення електронів від анодного (верхнього) контакту. Розрахунок траєкторій виконувався в квазістаціонарному наближенні, тому що можна вважати поля незмінними за час прольоту електронів між контактами.

Струм індуктора, при якому відбувалася відсічення електронів, визначався в серії розрахунків, починаючи з малих значень.

#### 4.1.5 Результати моделювання

На рис.4.5 наведені результати розрахунків конфігурації силових ліній магнітного поля в ВВ з контактами без щілин (рис.4.5а) і з радіальною щілиною в верхньому контакті (рис.4.5б). Результати представлено у тривимірному відображенні.

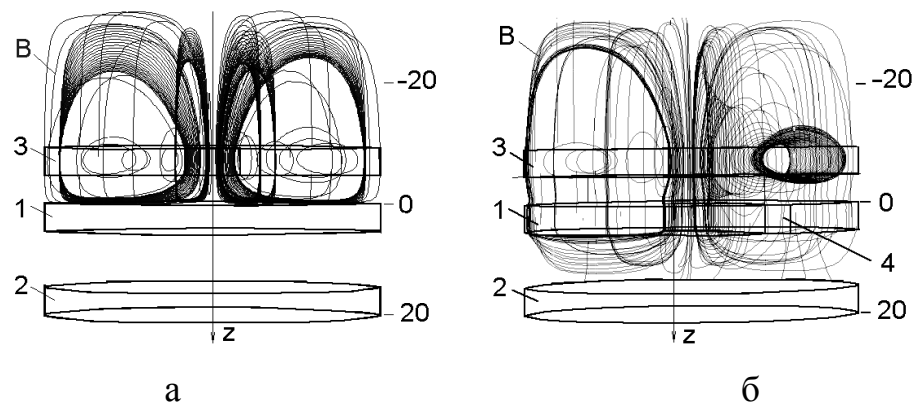


Рис. 4.5 Силові лінії магнітного поля в ВВ з контактами без щілин (а) і з радіальною щілиною в верхньому контакті (б);  $f = 50$  кГц,  $IW = 1,5$  кА·вит.

Можна бачити, що в кілогерцевому діапазоні частот при відсутності щілини у верхньому контакті має місце магнітне екранування (рис.4.5а). Навіть на частоті 1 кГц генерується дуже слабе магнітне поле в просторі між контактами і індукується незначний вихровий струм в нижньому контакті.

Ситуація кардинально змінюється при наявності щілини. Радіальну щілину у верхньому контакті перетворює систему "індуктор – верхній контакт" в трансформатор з плоскою одновитковою вторинною обмоткою (її роль відіграє верхня поверхня верхнього контакту), навантаженою плоским одновитковим індуктором (його роль відіграє нижня поверхня верхнього контакту). Кондуктивний зв'язок між площинами здійснюється по внутрішніх стінках радіальної щілини. Плоский одновитковий індуктор генерує магнітне поле в проміжку під верхнім контактом і наводить вихровий струм в нижньому контакті. Останній генерує вторинне магнітне поле в проміжку, яке узгоджене у напрямку з первинним полем плоского одновиткового індуктора. В результаті, магнітне поле концентрується в проміжку між контактами за рахунок екрануючого дії великої електричної провідності матеріалу нижнього контакту.

З рис.4.5б видно, що в більшій частині проміжку між контактами генерується радіальне магнітне поле, ортогональне електричному полю, яке направлено вздовж осі  $z$ . Ці поля і забезпечують траєкторію електронів, яка забезпечує відсічення електронів, емітованих нижнім контактом з негативним потенціалом.

На рис.4.6 наведені результати розрахунків розподілу щільності вихрового струму індукції в тілі контактів у ВВ. Положення контактів позначені заштрихованими прямокутниками.

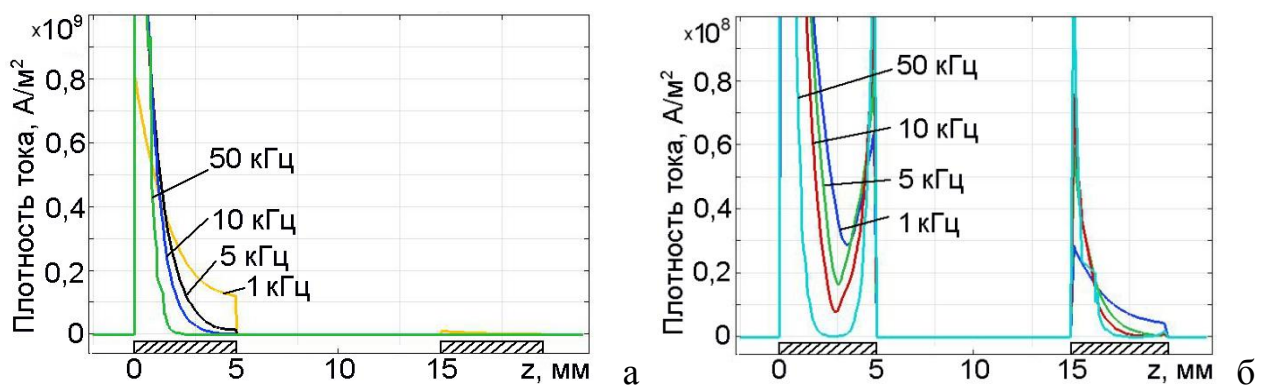


Рис. 4.6 Розподіл щільності вихрового струму індукції в тілі контактів у ВВ з контактами без щілин (а) і з радіальної щілиною в верхньому контакті (б) при різній частоті харчування індуктора;  $IW = 1,5$  кА·вит.

Отриманий розподіл струму використовується для подальшого розрахунку конфігурації магнітного полі у проміжку між контактами ВВ.

На рис.4.7 наведені траєкторії електронів, емітованих з середньої частини нижнього контакту. Як видно, ефект відсічення проявляється в повній мірі для цих електронів, тому що для них поверхня анода є магніто-ізолюваною. Для цих електронів чисельне визначення  $B_{кр}$  відповідає розрахунку за формулою (4.1) не дивлячись на неоднорідність магнітного поля в проміжку між контактами, а також підтверджується функціональна залежність  $(I \cdot W)_{кр} \sim \frac{1}{\Delta_2} \sqrt{U}$  у відповідності з (4.1).

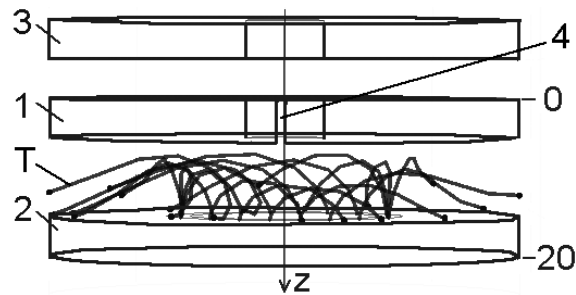


Рис. 4.7 Траєкторії електронів (Т) в режимі відсічення;  $f = 50$  кГц,  $U = 10$  кВ,  $IW = 1,5$  кА·вит. Траєкторії відповідають амплітудному значенню магнітного поля.

У той же час ефект відсічення порушується для електронів, емітованих периферійною частиною контакту в область, де ослаблене радіальне магнітне поле і частина електронів може бомбардувати верхній контакт. Вочевидь, потрібно оптимізувати форму контактів для вирішення даної проблеми.

Таблиця 4.2. Вплив кількості радіальних щілин у верхньому контакті на  $(IW)_{кр}$

Кількість щілин у верхньому контакті, $N$	$(IW)_{кр}$ , кА·вит
1	1,5
2	1,4
4	1,1
6	0.95
8	0.85
$f = 50$ кГц, $U = 10$ кВ	

У табл.4.2 наведені дані розрахунку критичної величини ампер-витків індуктора  $(IW)_{кр}$  при різній кількості радіальних щілин у верхньому контакті (аноді). Ширина щілин становила 1 мм. Як видно, величина  $(IW)_{кр}$  знижується при

збільшенні кількості радіальних щілин, що можна пояснити більш сильним проникненням імпульсного магнітного поля індуктора в проміжок між контактами, зокрема, за рахунок зниження омичних втрат в скін-шарах всередині радіальних щілин для вихрового струму, індукованого в тілі верхнього контакту.

#### 4.2 Моделювання магнітного гасіння вакуумної дуги полем анода-концентратора

Одним із завдань розробки електронних приладів великої потужності є розробка комутуючих приладів – переривників струму (ПС), здатних швидко вимикати струм у десятки кіло ампер при напрузі в десятки кіловольт. На основі таких приладів будуються ефективні високовольтні імпульсні системи для прискорювачів заряджених частинок, накачування потужних лазерів, генерування ВЧ і НВЧ коливань, перспективних імпульсних технологій обробки матеріалів; також важливим застосуванням таких приладів є захист від перенапруг і коротких замикань [54,55]. Традиційними швидкодіючими електронними переривниками струму є вакуумні лампи та напівпровідникові прилади, які замикаються. Недоліком вакуумних ламп є велике падіння напруги на них в період провідності. А напівпровідникові прилади можуть комутувати відносно малу напругу.

Вакуумні переривники, які використовують низьковольтний дуговий розряд в парах матеріалу електродів для комутації струму, позбавлені зазначених недоліків. Але їх використання можливе лише за умови керованого і надійного гасіння вакуумної дуги. Один із способів переривання дуги заснований на генерації в міжелектродному проміжку імпульсного магнітного поля поперечного до електричного. Причому індукція магнітного поля повинна бути такою, щоб забезпечити сильне зростання імпедансу замагніченої плазми дугового розряду, а падіння напруги на ньому досягало рівня напруги джерела живлення. Експерименти підтвердили практичну здійсненність подібного способу управління. Однак його фізичний механізм ще не цілком ясний, тому що він включає різноманітні і складні процеси: вплив магнітного поля на катодні плями; рух електронів і їх розлітання в проміжку між електродами під дією сили Лоренца;

управління напрямом плазмових струменів з катодних плям. Крім того, відбуваються процеси, які можуть призводити до повторного запалювання дуги в період деіонізації плазми і конденсації пари, коли наростає напруга на електродах.

Мета дослідження – моделювання та дослідження ефекту магнітного відсічення катодних електронів від анода в заключний період переривання струму – на стадії деіонізації плазми і конденсації металевої пари, коли катод ще здатний випускати електрони за рахунок залишкової термоелектронної емісії і вторинної  $\gamma$ -емісії через бомбардування катода залишковими іонами.

Відсічення електронів важливе для реалізації ефекту магнітної ізоляції анода, усунення його нагріву електронним бомбардуванням і підвищення імпедансу приладу. Важливо також визначати умови, при яких електрони не повертаються на катод, оскільки ці умови разом з відсіченням електронів ускладнюють повторне запалювання дуги. В роботі також визначався вплив конструкції анода на ці процеси. Дослідження базувалося на методі траєкторного аналізу електронів.

#### 4.2.1 Принцип дії вакуумного переривника струму

Робота вакуумного ПС заснована на перериванні стаціонарної вакуумної дуги, яка існує під час замкнутого стану комутатора, який проводить електричний струм. Характеристики ПС залежать в основному від параметрів вакуумної дуги.

Вакуумна дуга являє собою розряд у пароплазмовому середовищі між катодом і анодом. Матеріал катода локально розігрівається іонами, які випаровується з анода і іонізується в полум'ї дуги, утворюючи високопровідне середовище, яке має істотні переваги перед ламповими ключами. При включенні поперечного магнітного поля, потік електронів починає відводитися від анода на колектор (в перемикачах струму – на другий анод). Після проміжку часу приблизно рівному періоду деіонізації іонізованих часток парів металів струм припиняється.

Вакуумно-дугового розряд є майже ідеальним інструментом комутації: у непровідному стані електроди ПС розділяє високий вакуум, який є ідеальним ізолятором, а в провідному стані вакуумна дуга має мале падіння напруги при струмі, який досягає тисяч ампер.

На рис.4.8 показана конструкція і схема включення вакуумно-дугового ПС з циліндричною коаксіальною конфігурацією електродів, здатна обмежувати або переривати струм [56]. Катодом є електрод, розташований на осі, а анодом служить кільце, яке оточує катод. Струм дуги може бути обмежений або перерваний аксіальним магнітним полем з силовими лініями перпендикулярним траєкторіям електронів, що рухаються від катода до анода, тобто силовими лініями електричного поля. Вакуумно-дуговий розряд між катодом і анодом збуджується за допомогою додаткового електрода (не показаний), аналогічно до підпалювача ігнітрона. На електрод, призначений для підпалювання розряду, подається імпульс струму, який ініціює первинні катодні плями. Утворюється струм на анод, який випаровує з його поверхні атоми і одночасно іонізує їх. В результаті між катодом і анодом виникає дуга з часом наростання струму  $\sim 1$  мкс.

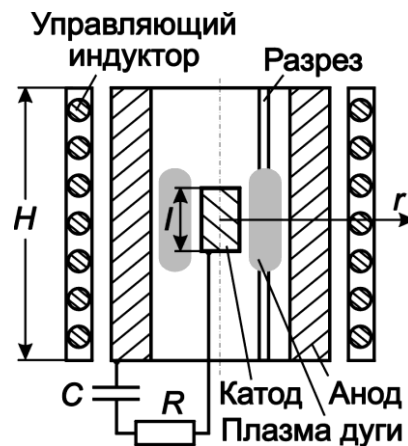


Рис. 4.8 Конструкція переривника струму і схема його включення:  $C$  — ємність накопичення і  $R$  — опір навантаження

У провідному стані падіння напруги на дузі становить близько 50 В. Магнітне поле збільшує падіння напруги на дузі і знижує, внаслідок цього, струм розряду. Для створення МП використовують індуктор, який охоплює анод. При подачі струму в індуктор генерується осьове МП, ортогональне електричному полю, що призводить до зростання величини падіння напруги на ПС до величини напруги джерела живлення, і в результаті до гасіння дугового розряду.

Після розряду внаслідок відходу електронів на анод залишкова плазма набуває високий позитивний потенціал, який може наблизитися за величиною до потенціалу анода і джерела живлення. Це призводить до бомбардування катода

високоенергетичних іонами, його нагріванню, і, як наслідок, до вторинної і термоелектронної емісії. Анод, в свою чергу, можуть бомбардувати катодні електрони і нагрівати його, аж до плавлення. У деяких конструкціях ПС і режимах експлуатації між котушкою індуктора і анодом може існувати значна напруга, яка може призвести до виникнення електричної дуги. Виникнення між ними дуги може викликати погіршення характеристик і в кінцевому рахунку відмову ПС. У таких випадках, замість конструкції анод-катод-котушка, показаної на рис.4.8, можна використовувати індукційну котушку тільки з одного або двох витків. Застосовуючи для її живлення імпульсний трансформатор, таку котушку можна використовувати і як анод, і як засіб гасіння дуги.

В ідеальному випадку траєкторія електронів в схрещених полях має форму циклоїди, приклади якої наведені на рис.4.9 [57]. При певній напруженості електричного і магнітного полів електрони не можуть досягти анода – виникає ефект відсічення. Ефект відсічення полягає в тому, що під дією сили Лоренца електрони відхиляються від напрямку дії силової лінії електричного поля і не потрапляють на анод, тобто припиняється струм на анод (рис.4.2а). Для цього індукція магнітного поля  $B$  повинна бути більше деякої критичної величини  $B_{кр}$  (рис.4.2б).

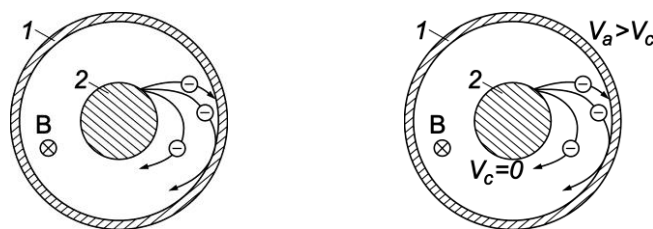


Рис. 4.9 Циклоїдний рух електрона в схрещених електричному і магнітному полях

Ефект відсічення відповідає умові, коли висота циклоїдної траєкторії електронів менше відстані між анодом і катодом. Ефект настає при певній індукції магнітного поля  $B_{кр}$ , яка називається критичною [51] і визначається за формулою (4.1). Умова (4.1) використовується для верифікації чисельних розрахунків в цьому дослідженні.

Вираз (4.1) отримано без урахування крайових ефектів, існуючих в реальних конструкціях вакуумних ПС. Сучасні обчислювальні засоби дозволяють проводити

розрахунки з урахуванням крайових ефектів: визначення конфігурації полів на краях електродів, дрейфу і дифузії електронів за межі простору, охопленого анодом.

Нижче наведені робочі параметри існуючих вакуумних ПС:

- постійна напруга до 25 кВ;
- струм до 10 кА;
- частота повторення до 1 кГц;
- час включення (виключення) – 1 (2) мкс;
- плавне регулювання тривалості імпульсу.

#### 4.2.2 Електродні структури переривника струму

Переривники струму складаються з циліндричного катода, розташованого на осі симетрії і анода складної форми. При необхідності додається колектор – електрод для уловлювання відведених (відсічених) від анода електронів. Застосовуються конструкції, в яких потік електронів короткочасно перенаправляється з одного електрода на інші наведеним магнітним полем. Конструкції переривника у розрізі збережена на рис.4.10.

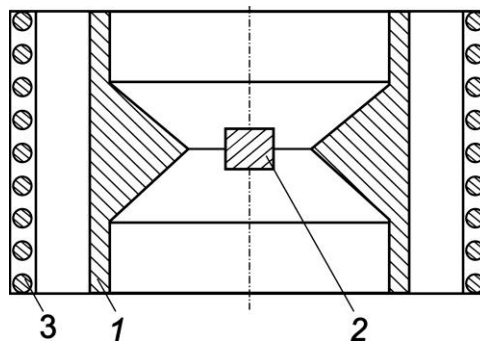


Рис. 4.10 Конструкція переривника струму:

1 – анод, 2 – катод, 3 – індуктор

Катод виготовляються з матеріалу з високою емісійною здатністю і можливістю тривалої роботи під дією дугового розряду.

Для зменшення геометричних розмірів приладу та струму відсічення в індукторі застосовують анод-концентратор магнітного поля, який служить вторинною обмоткою трансформатора, де індуктор виступає первинною обмоткою. В цьому випадку анод виготовляють з радіальним розрізом. Приклад таких



конструкцій зображено на рис.4.11, де з лівого боку анод має розріз в осьовій площині. На рисунку також наведені геометричні параметри досліджуваних конструкцій переривника струму.

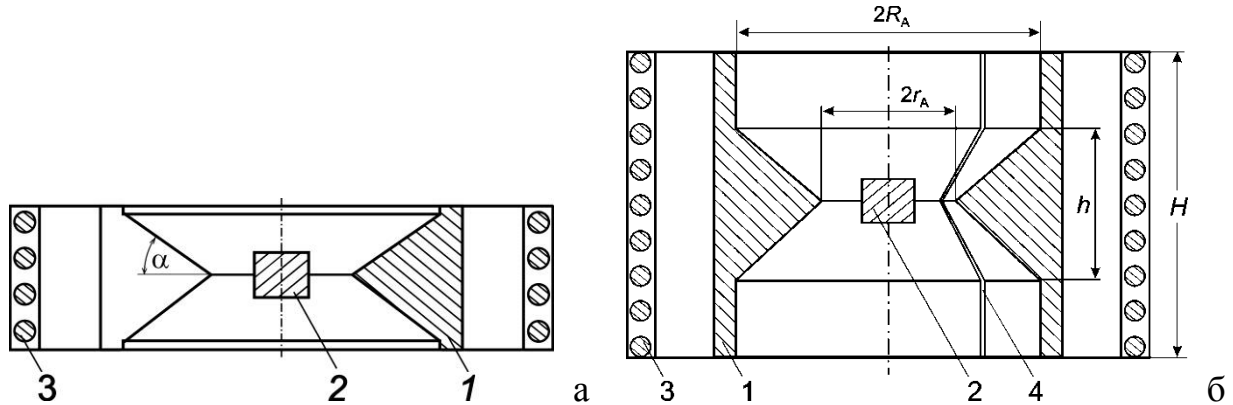


Рис. 4.10 Модифіковані конструкції анода досліджених переривників струму: 1 – анод, 2 – катод, 3 – індуктор, 4 – радіальний переріз

Ширина розрізу в аноді повинна бути мінімальна, але забезпечувати електричну міцність зазору. Зазвичай ширина розрізу становить 1 мм [54].

Не дослідженим залишається питання про оптимальну висоту анода і висоту частини анода, яка утворена конічними поверхнями, оптимальний кут нахилу твірної  $\alpha$  цих поверхонь.

#### 4.2.3 Математична модель переривника струму

Алгоритм розрахунків параметрів процесів в вакуумному ПС реалізований згідно фізико-топологічної моделі аналогічній моделі, яка представлена на рис.4.4. Вона включає математичні моделі електричного поля між анодом і катодом, магнітного поля індуктора, модель емісії електронів з поверхні катода і кінетичну модель руху електронів в електромагнітному полі. Дослідження виконані чисельним розрахунком параметрів та характеристик по позначеним моделям.

Фізико-топологічна модель також враховує вплив геометричних розмірів всіх елементів ПС, емісійні, електричні і магнітні властивості матеріалів, напругу на електродах, струми керуючої котушки (індуктора).

Досліджувалася найбільш поширена конструкція з циліндричними коаксіальними електродами. При розрахунках визначалися:

– величина і розподіл струмів в аноді і індукторі;

- розподіл магнітного поля в просторі ПС;
- розподіл електричного поля в просторі ПС;
- траєкторії електронів, емітованих катодом;
- умови переривання струму.

Визначення поля струмів в індукторі і аноді-концентраторі, конфігурації електричного і магнітного полів проводилося з математичної моделі заснованої на рівняннях Максвелла для вакууму і провідникових середовищ, відповідно до рівнянь (4.2) – (4.8), і граничних умов адаптованих до форми елементів ПТ.

У рівнянні (4.3) член  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  не враховувався внаслідок низьких робочих частот (менше 1 МГц), а у рівнянні (4.5) не враховувався просторовий заряд  $\rho$  із-за його незначної ролі при високих напругах, що застосовуються у ПС. Вектор електричної поляризації  $\mathbf{P}$  і магнітний вектор  $\mathbf{M}$  приймалися рівними нулю.

При розрахунку магнітного поля ПС враховувалося поле, створюване безпосередньо індуктором, і вторинні магнітні поля, що генеруються індукційними струмами в аноді ( $j_{\text{вихр}}$ ). При цьому струм в індукторі визначався як сума стороннього струму, створеного зовнішнім електричним ланцюгом  $j_{\text{стор}}$ , і вихрового струму  $j_{\text{вихр}}$ , індукованого змінним магнітним полем електродів, відповідно до (4.9).

При вирішенні системи рівнянь Максвелла для різних частин (середовищ) ПС застосовувалися загальноприйняті граничні умови, які використовуються при розрахунках індукції.

Початкова кінетична енергія (швидкість) електронів, емітованих з поверхні катода задавалася рівною нулю. Напрямок вильоту з поверхні визначався напрямком силових ліній електричного поля, що характерно для автоелектронної (польовий) емісії. Емісія електронів задавалася рівномірним розподілом точок емісії по поверхні катода.

Модель траєкторії електронів в електричному і магнітному полях в просторі ПС заснована на другому законі Ньютона з урахуванням дії сили Лоренца ( $\mathbf{F}$ ). Розрахунок траєкторій руху електронів (трасування) по цій моделі проводився з урахуванням диференціальних параметрів попередньо обчислених електричного і магнітного полів. Сила, що діє на електрон, визначалася за значенням векторів  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$



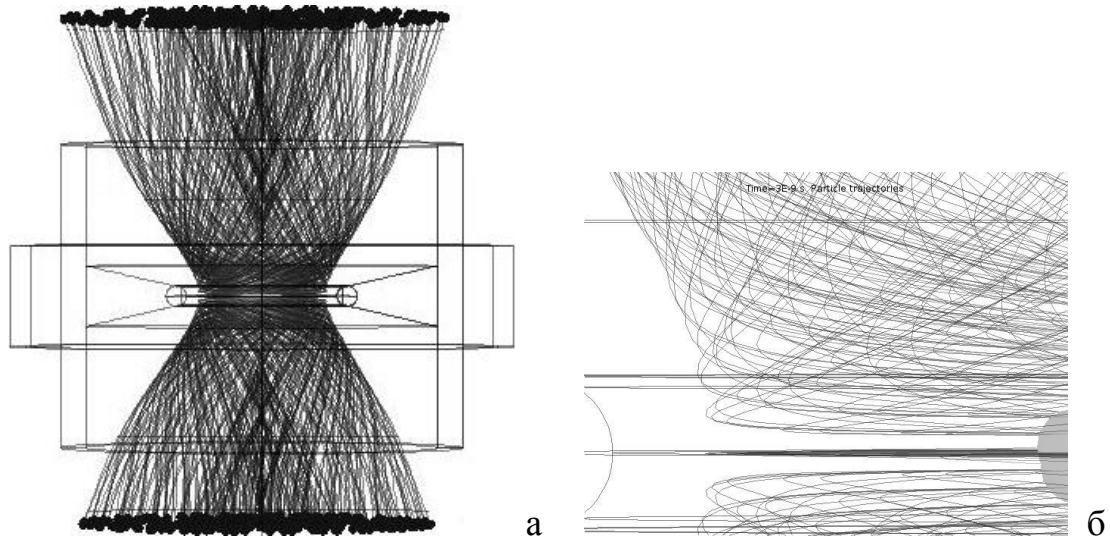


Рис. 4.12 Траєкторії 100 електронів в ПС без колекторів в режимі переривання струму (а) та збільшений фрагмент розрахованих траєкторій (б)

На рис.4.12б показаний фрагмент збільшеного зображення розрахованих траєкторій поблизу катода. Видно, що електрони, що емітують в площині симетрії електричного поля, повертаються на катод. Решта електронів захоплюються електричним полем в периферійні області ПС минаючи анод, як видно з рисунків.

На рис.4.13 наведено профілі максимального відхилення електронів від осі ПС в залежності від висоти внутрішньої частини аноду, яка сходиться до середини ПС. Висота воронкоподібної частини анода задавалася рівною 10, 20, 30 і 40 мм: відповідні їм лінії позначені від 1 до 4.

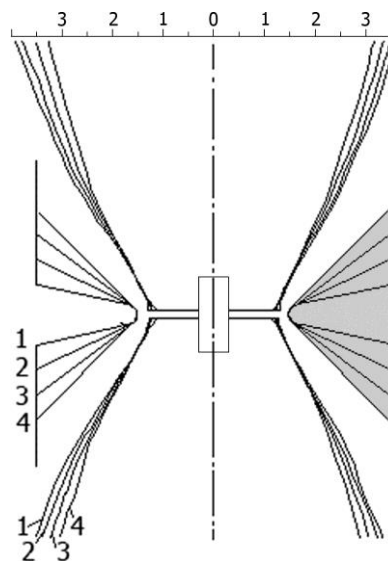


Рис. 4.13 Профілі максимального відхилення електронів від осі ПС при різних конструкціях анода

Форма профілю траєкторій електронів, показана на рис.4.13, дозволяє визначити розміри і положення колекторів відсічених електронів.

На рис.4.14 показана розрахована конфігурація електричного поля в ПС з колекторами електронів.

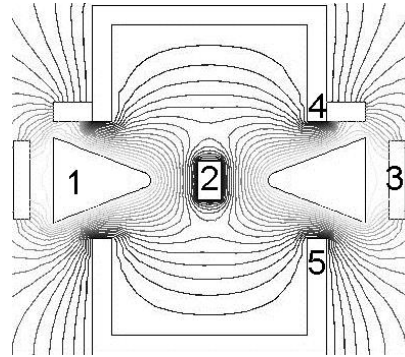


Рис. 4.14 Конфігурація електричного поля в ПС: 1 – анод, 2 – катод, 3 – індуктор, 4 і 5 – колектори (крок еквіпотенціалей 500 В)

На рис.4.15а наведені графіки напруженості магнітного поля уздовж п'яти ліній в просторі між катодом 2 і анодом 1 досліджуваного ПС. Розташування ліній представлено на рис.4.15б, нижня лінія розташована в площині симетрії. Відстань між лініями – 1 мм. Також на рисунку показаний схематично індуктор 3, колектори верхній 4 і нижній 5.

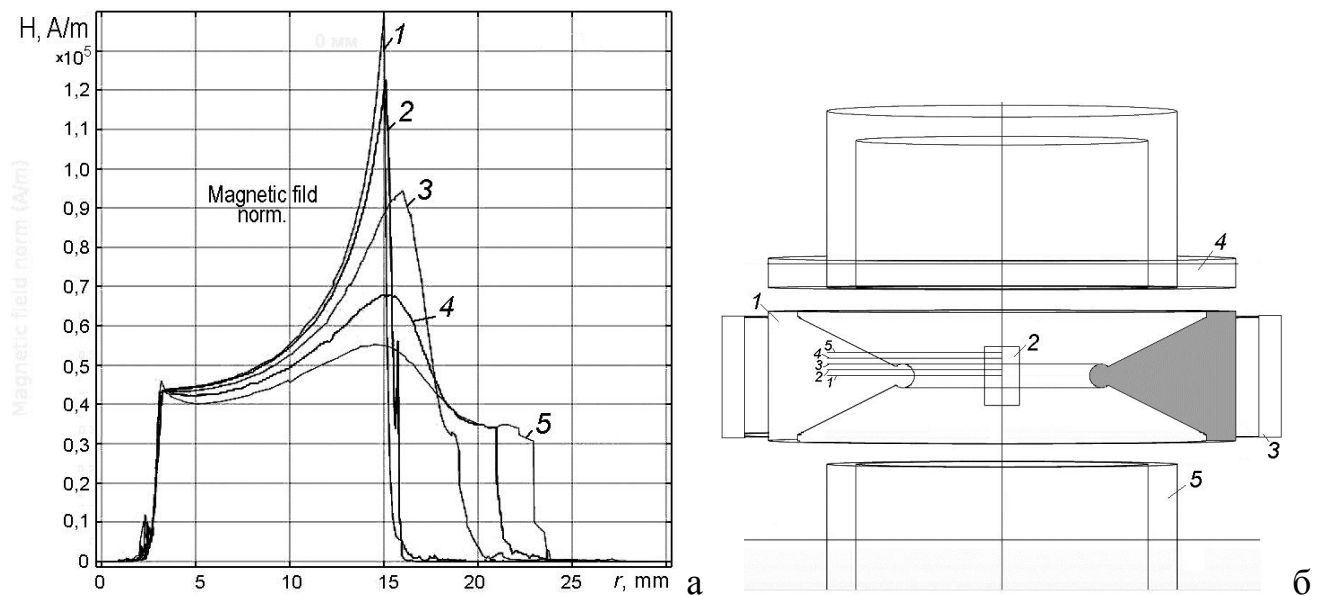


Рис. 4.15 Напруженість магнітного поля (а) уздовж січних ліній в ПС (б).

Відстань між лініями 1 мм

Розрахований розподіл напруженості магнітного поля між анодом і катодом (рис.4.15) демонструє адекватність розрахунків фізичній моделі. Магнітне поле існує тільки в проміжках між електродами і різко спадає в електродах в межах скін-шару біля поверхні за експоненціальною залежністю. Максимальна напруженість МП спостерігається на осі симетрії анода, що адекватно фізичній моделі. Порухення монотонності кривих пов'язане з раціонально обмеженою точністю розрахунків, який обмежує ресурс часу і потужності комп'ютера. Якість розрахунку структури МП може слугувати верифікацією адекватності математичної моделі і методу розрахунків фізичній моделі ПС.

На рис.4.16 зображені розраховані траєкторії електронів в ПС в замкнутому (провідному) стані, тобто у відсутності магнітного поля індуктора. Видно, що всі траєкторії замикаються (закінчуються) на аноді. Форма траєкторій визначається конфігурацією електричного поля і впливом об'ємного заряду самих електронів. Напруга на аноді задавалася 10 кВ, кількість електронів – 1000.

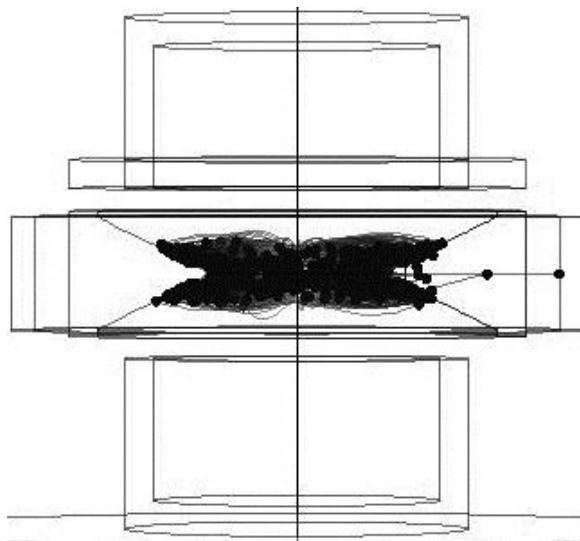


Рис. 4.16 Траєкторії електронів в ПС в провідному стані

На рис.4.17 зображені розраховані траєкторії електронів в ПС в розімкнутому стані, тобто при магнітному полі індуктора. Струм котушки – 1000 А·витків. Кругечки зображують кінцеві точки траєкторій після розрахункового інтервалу часу, який склав 1 нс. Наведені приклади для різних напруг на колекторах: рис.4.17а для  $U_k = 50$  В, рис.4.17б для  $U_k = 300$  В. Видно, що збільшення напруги на колекторах дозволяє замкнути на колекторах більше траєкторій, тобто забезпечує більшу ефективність ПС. Наприклад, при  $U_k = 50$  В на колекторах не

замикаються 15 траєкторій (точки по периферії ПС). В подальшому ці траєкторії можуть замкнутися на аноді. При  $U_k = 300$  В тільки одна траєкторія не замкнулася на колекторах через інтервал часу у  $10^{-9}$  с.

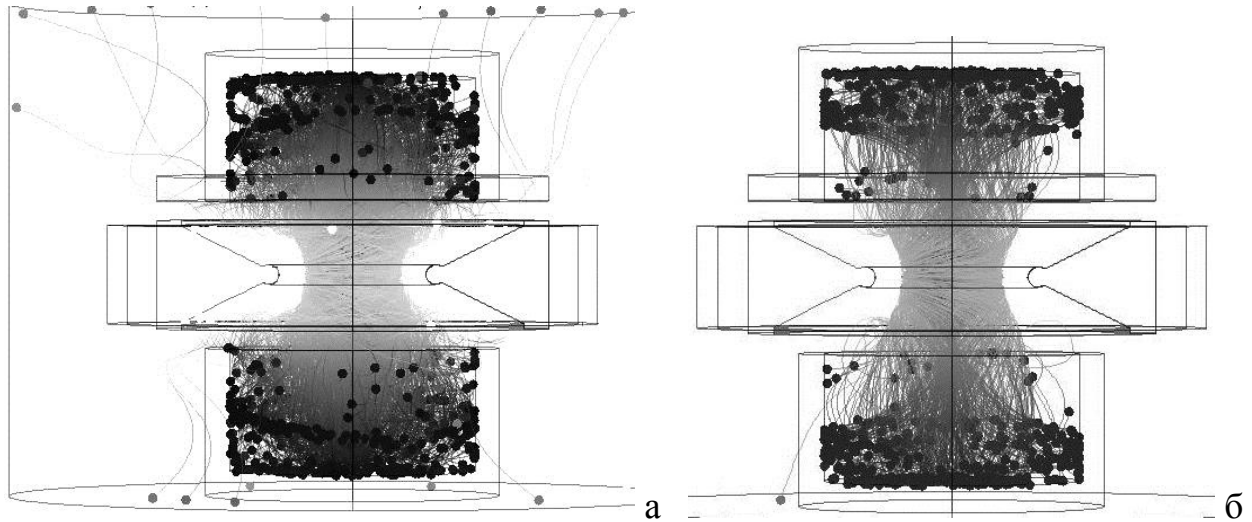


Рис. 4.17 Траєкторії електронів ПС в режимі переривання струму при: а –  $U_k = 50$  В, б –  $U_k = 300$  В

Для верифікації розрахунків було проведено порівняння критичної напруженості магнітного поля за формулою (4.1) і розрахованого по запропонованому алгоритму фізико-топологічної моделі. Формула (4.1) отримана для ідеалізованої конструкції, де анод і катод є коаксіальними циліндрами, довжина яких значно більша величини їх поперечного перерізу.

Значення критичної індукції магнітного поля для тестової конструкції ПС за виразом (4.1) склало  $B_{кр} = 4,7$  мТл. Тестова конструкція ПС приведена на рис.4.18. Довжина електродів – 100 мм, діаметри катода – 6 мм, анода – 30 мм. Відсічення електронів в такій конструкції настає при струмі індуктора 38 А·витків. Напруженість магнітного поля у поверхні анода склала  $B_{кр} = 4,75$  мТл.

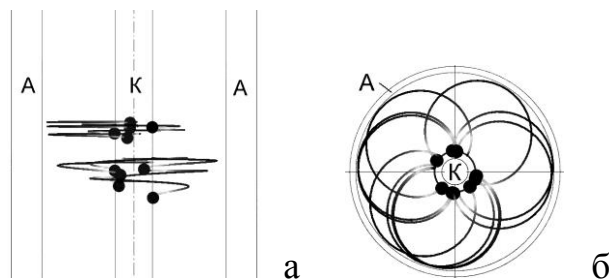


Рис. 4.18 Траєкторії електронів в тестовому ПС в режимі переривання струму: а – вид збоку, б – вид зверху

На рис.4.19 наведено розподіл індукції магнітного поля в просторі між анодом і катодом тестового ПС (графік 1). Там же показано аналогічний розподіл для конструкції ПС з коротким катодом, довжиною 10 мм (графік 2).

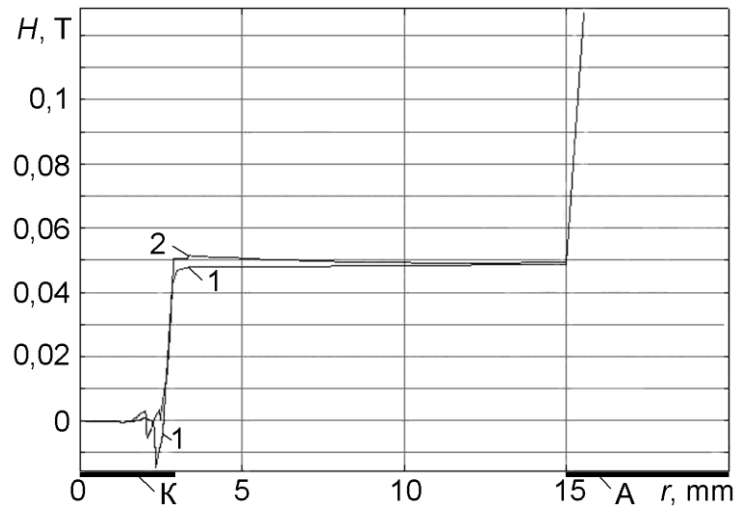


Рис. 4.19 Розподіл індукції магнітного поля в просторі між анодом і катодом тестового ПС

Видно, що для тестової конструкції ПС розрахункове значення критичної індукції магнітного поля  $B_{кр}$  між електродами змінюється від 4,7 до 4,8 мТл. Такий результат можна вважати повним узгодженням з теоретичним розрахунком.

На рис.4.20 наведено приклад траєкторій електронів для конструкції ПС з коротким катодом.

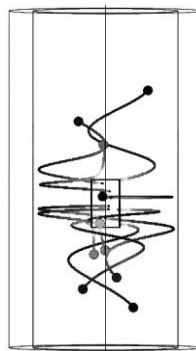


Рис. 4.20 Траєкторії електронів в ПС з коротким катодом в режимі переривання струму



Видно, що траєкторії електронів витягуються уздовж осі електродів. Це вимагає збільшення індукції магнітного поля для реалізації ефекту відсічення, як і показали розрахунки (див. крива 2 на рис.4.19).

#### 4.3 Висновки до розділу

1. Розроблено фізико-топологічну математичну модель плоского вакуумного діода з магнітним керуванням на прикладі вакуумного вимикача з діодною структурою з плоскими контактами і зовнішнім індуктором у вигляді плоскої спіралі. Розрахунки, виконані за допомогою моделі, дозволили визначити розподіл імпульсного магнітного поля між контактами з урахуванням вихрових струмів, індукованих в тілі контактів, і траєкторій електронів, емітованих контактом з негативним потенціалом. На моделі досліджені умови реалізації ефекту відсічення електронів в схрещених полях для придушення рентгенівського випромінювання з вимикача, викликаного бомбардуванням позитивного електроду електронами при високій напрузі. Показана доцільність застосування під індуктором контакту з радіальними щілинами в кількості не менше чотирьох, щоб знизити на десятки відсотків критичний струм індуктора. Для повної магнітної ізоляції контактів від електронного бомбардування потрібно оптимізувати конструкцію контактів для усунення крайових ефектів; зокрема, в подальшому доцільно дослідити ефект відсічення в системі з електродами кільцевої форми, щоб траєкторії автоемісійних електронів починалися в зоні дії радіального магнітного поля.

2. Розроблена модель плоского вакуумного діода з магнітним керуванням також може застосовуватися для аналізу умов магнітного ініціювання магнетронного розряду між плоскими електродами в газорозрядних приладах і джерелах заряджених частинок, в яких використовується відсічення електронів в схрещених полях [55].

3. Здійснено 3D моделювання процесів гасіння вакуумної дуги магнітним полем у високовольтному переривнику струму з циліндричними електродами. Розрахунок параметрів процесів проводився за алгоритмом запропонованої фізико-топологічної моделі переривника струму. Параметри, що характеризують процес

гасіння вакуумної дуги (переривання струму) визначалися статистично: обчислювалася частка електронів, траєкторії яких замикалися на колекторах, а не на аноді. Трасування траєкторій електронів проводилася з урахуванням впливу електричного поля електродів і магнітного поля від зовнішньої котушки індуктивності. Вплив поля об'ємного заряду електронів не враховувався. Розрахунки виконані чисельним методом кінцевих елементів. Досліджено вплив магнітного поля зовнішнього індуктора і конструкції електродів переривника струму на процес гасіння вакуумної дуги.

4. Запропоновано комп'ютерний алгоритм для моделювання та дослідження ефекту відсічення електронів в системі циліндричного електрода в імпульсному магнітному полі зовнішнього індуктора. Враховується вплив вторинних магнітних полів, що генеруються вихровими струмами в електродах. Доведена успішна верифікація чисельних результатів.

5. У системі з неоднорідністю геометрії, і як наслідок неоднорідністю електричного і магнітного полями вздовж осі (завдяки короткому катоду, складній конструкції анода, для концентрації магнітного поля, короткий індуктор) циклоїдальна природа об'ємних траєкторій електронів перетворюється в спіральну форму з виходом з проміжку між електродами. Для отримання ефекту відсікання необхідно перехопити електрони, що виходять з проміжку між електродами. Для цього доцільно ввести чашкоподібні колектори з позитивною напругою 300 В при анодній напрузі до 10 кВ.

6. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні високовольтного комутуючого обладнання, а також для аналізу умов магнітної ініціації магнетронного розряду низького тиску та характеристик магнетронних електронних гармат.

## ВИСНОВКИ

1. Для оптимізації конструкції і режимів експлуатації приладів з ВЧ концентрацією електромагнітної енергії необхідне застосування фізико-топологічного моделювання. Хоча комп'ютерні програми і самі комп'ютери розвинуті до задовільної для ефективного дослідження потужності, приклади моделювання приладів обмежені окремими спеціалізованими прикладами. Фізико-топологічні моделі приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного представлені частково і потребують подальшого розвитку. Всі процеси, на яких ґрунтується робота приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, описані фізико-математичними моделями. Але здебільшого ці моделі проаналізовані для ідеалізованих систем: з компонентами, як правило, з необмеженими еквідистантними поверхнями; з одновимірним аналізом процесів. Систематичні теоретичні дані про енергетичні характеристики приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля відсутні, не розглянуто вплив на них конструктивних параметрів реальних приладів. Відсутні критерії оцінки ефективності таких приладів, систематизація приладів і параметрів що характеризують їх роботу. Більшість дослідних робіт виконано для вирішення окремих (приватних) технічних задач, і їх досвід не узагальнений. Відсутні моделі, що зв'язують електричні параметри приладів з геометричними розмірами його компонентів. Встановлено, що фізико-топологічне моделювання приладів з ієрархією пов'язаних процесів перетворення енергії від енергії, яка поглинається індуктором до енергії частинок парового потоку не проводився ні для одного типу конструкції.

2. Вперше запропоновано узагальнену фізико-топологічну модель приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. Дослідження за фізико-математичною моделлю дозволяють передбачити характер і параметри електричних, теплових і емісійних процесів в компонентах приладів і паровому потоці випарника.

На основі ієрархічного дослідження пов'язаних фізичних процесів запропонована методика вибору конструкції приладу і задача його дослідження:

- визначення впливу конструкції компонентів приладу на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію частинок парового потоку і ефективність колімації потоку електронів;

- визначення впливу фізичних властивостей компонентів приладу на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію нейтральних частинок і ефективність колімації потоку електронів;

- визначення впливу частоти струму індуктора на ефективність перетворення електричної енергії джерела в енергію парових частинок і ефективність колімації потоку електронів.

3. Застосовано фізико-топологічне моделювання до випарника з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, в просторі якого магнітне поле струму індуктора описується рівнянням в приватних похідних щодо комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу. Встановлено тривимірний розподіл індукції магнітного поля, який визначає граничні умови при розрахунку за рівнянням повного струму тривимірного розподілу струму в елементах випарника. За розподілом струму встановлено розподіл джерел тепловиділення, який є граничною умовою при розрахунку нелінійного рівняння теплопровідності для стаціонарної задачі. Розрахований тривимірний розподіл температури в тиглі з завантаженням, з урахуванням теплових потоків через поверхні елементів випарника. На відміну від існуючих, запропонована модель враховує просторовий розподіл фізичних характеристик в елементах випарника у всіх процесах перетворення енергії, що дозволило досягти адекватності моделей в межах областей їх застосовності і досягти узгодження з експериментальними даними.

4. При автотрансформаторній конструкції випарника з концентрацією електромагнітної енергії розрахована напруга на індукторі, яка при частоті 440 кГц забезпечує робочу температуру випаровування 1545 К (для міді) становить 273 В.

5. Інтегральна похибка чисельних розрахунків за фізико-топологічною моделлю приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля при використанні МСР визначається тільки похибкою визначення фізичних властивостей речовин, які вводяться в модель як початкові умови, і складає в загальному випадку одиниці відсотків.

6. На підставі розрахунків за фізико-математичними моделями для різних конструкцій індукційних випарників вперше встановлено, що у випарнику з ВЧ концентрацією магнітного поля, не залежно від діаметру тигля і його положення в концентраторі, температура на поверхні випаровування може вважатися однаковою з похибкою не більше 0,5 %.

7. Неоднорідність температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму живлення і становить 2 К при діаметрі тигля 32 мм. Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні  $0,0013 \div 0,002$ .

8. При трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, яка виділяється у випарнику на 12,3% більше ніж у випарника з трансформаторним з'єднанням індуктора і концентратора.

9. За розподілом напруженості електричного потенціалу та індукції магнітного поля випарника в робочому режимі над тиглем з завантаженням, розраховані траєкторії електронів, які емітують з поверхні розплаву завантаження. Встановлено, що на відстані  $40 \div 50$  мм над тиглем випарника електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді (потенціал іонізації – 7,72 еВ).

10. Розроблено фізико-топологічну математичну модель плоского вакуумного діода з магнітним керуванням на прикладі вакуумного вимикача з діодною структурою з плоскими контактами і зовнішнім індуктором у вигляді плоскої спіралі. Розрахунки, виконані за допомогою моделі, дозволили визначити розподіл імпульсного магнітного поля між контактами з урахуванням вихрових струмів, індукованих в тілі контактів, і траєкторій електронів, емітованих контактом з негативним потенціалом. На моделі досліджені умови реалізації ефекту відсічення електронів в схрещених полях для придушення рентгенівського випромінювання з вимикача, викликаного бомбардуванням позитивного електроду електронами при високій напрузі. Показана доцільність застосування під індуктором контакту з радіальними щілинами в кількості не менше чотирьох, щоб знизити на десятки відсотків критичний струм індуктора.

11. Здійснено 3D моделювання процесів гасіння вакуумної дуги магнітним полем у високовольтному переривнику струму з циліндричними електродами. Розрахунок параметрів процесів проводився за алгоритмом запропонованої фізико-топологічної моделі переривника струму. Параметри, що характеризують процес гасіння вакуумної дуги (переривання струму) визначалися статистично. Трасування траєкторій електронів проводилася з урахуванням впливу електричного поля електродів і магнітного поля від зовнішньої котушки індуктивності.

12. Запропоновано фізико-топологічну модель переривника струму та дослідження ефекту відсічення електронів в системі циліндричного електрода в імпульсному магнітному полі зовнішнього індуктора. Враховується вплив вторинних магнітних полів, що генеруються вихровими струмами в електродах. Доведена успішна верифікація чисельних результатів. У системі з неоднорідністю геометрії, і як наслідок неоднорідністю електричного і магнітного полями вздовж осі (завдяки короткому катоду, складній конструкції анода, для концентрації магнітного поля, короткий індуктор) циклоїдальна природа об'ємних траєкторій електронів перетворюється в спіральну форму з виходом з проміжку між електродами. Для отримання ефекту відсікання необхідно перехопити електрони, що виходять з проміжку між електродами. Для цього доцільно ввести чашкоподібні колектори з позитивною напругою 300 В при анодній напрузі до 10 кВ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. Maikut, Y. Bashkatov, L. Tsybulskiy, A. Kuzmichev. «Simulation of induction evaporator with magnetic field concentrator». IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, microwave, and terahertz applications, NEMO-2014 Papers (Flash): paper 185, 4 pages.
2. Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., Майкут С.А., Дрозд И.М.. «Индукционно-термический метод получения микро- и наночастиц». Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, 15:1 (2017): 141-162.
3. Майкут С.А., Дрозд И.М., Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., «Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора». Електроніка та зв'язок, 22:4 (2017): 11-17.
4. I. Drozd, A. Kuzmichev, S. Maikut, L. Tsybulsky. «Investigation of electron cut-off in a cylindrical electrode system in pulsed magnetic field of an inductor». PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. Series: Plasma Physics, 118:6 (2018): 281-284
5. Майкут С.А. «Кинетика электронов в цилиндрической системе с импульсным магнитным полем». East European Scientific Journal, 50:10 (2019): 27-33.
6. Патент України на корисну модель UA 141529 U, H01H 33/66. Вакуумний вимикач / А.І, Кузьмічев, Л.Ю. Цибульский, С.О. Майкут. – № u201910589; заявл. 25.10.2019; опубл. 10.04.2020. – Бюл. № 7/2019
7. С.О. Майкут, Л.Ю. Цибульский. Моделювання індукційного випарника з концентратором електромагнітного поля / // Труди 5-й конф. «Електроніка та інформаційні технології» (Чинадієво Закарпатської обл.). – 2013. – С. 145-148.
8. 9-я конференция, “Вакуумная техника, материалы и технология” (Россия, Москва, КВЦ «СОКОЛЬНИКИ», 2014, 15 – 17 апрель). Моделирование процессов в индукционном испарителе с концентратором электромагнитного поля / С.А. Майкут, Д.В. Ткаченко, Л.Ю. Цибульский // Труды конф. С. 105-108.

9. XII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» (Kyiv, Ukraine, October 19-22, 2016). CALCULATION OF VAPOR FLOW DENSITY OVER INDUCTION EVAPORATOR // Maikut S., L. Tsibulskiy A., Loktionov

10. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульський. «Моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». XI науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки" Київ, НТУУ «КПІ», – 2017. 6 – 7 квітня

11. С. Майкут, Л. Цибульський. «Проблеми моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». Дні науки ФСП. Людина у вимірах сучасного суспільства (Київ, НТУУ «КПІ». 2017. -20 - 21 травня)

12. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульський. «Моделирование высоковольтного прерывателя тока с магнитным гашением дуги». XXV International Workshop on Charged Particle Accelerators - Ukraine, Kharkov - September 18-22, 2017.

13. S. Maikut, L. Tsibulskiy, I. Drozd, A. Kuzmichev. «ANALYSIS OF ELECTRON TRAJECTORIES IN THE TWO-ELECTRODE SYSTEM OF A VACUUM CURRENT BREAKER WITH MAGNETIC CONTROL». XIII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» - Call for Papers - Kyiv, Ukraine\_24-27.10.17

14. Дрозд І.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.. «Моделирование вакуумного коммутатора тока с анодом в виде индуктора Матеріали». XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 4 квітня 2019 р.

15. Дрозд І.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., Майкут С.О., к.т.н., доц. Цибульський. «Моделювання процесу відсічення електронів у вакуумних переривниках струму із застосуванням концентраторів магнітного поля». Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2019. Київ, 11-12 грудня 2019 р.



16. Prat-Camps, Jordi & Navau, Carles & Sanchez, Alvaro. (2013). Experimental realization of magnetic energy concentration and transmission at a distance by metamaterials. *Applied Physics Letters*. DOI: [105. 10.1063/1.4903867](https://doi.org/10.1063/1.4903867).
17. K. Dongwook, B. Park, J. Park, H. H. Park, and S. Ahn, “Magnetic field concentration using ferromagnetic material to propel a wireless power transfer based micro-robot,” *AIP Adv.*, no. 8, 2018, DOI: [10.1063/1.5007774](https://doi.org/10.1063/1.5007774)
18. K. Tashiro, G.--ya Hattori, and H. Wakiwaka, “Magnetic flux concentration methods for magnetic energy harvesting module,” in *EPJ Web of Conferences*, 2013, p. 4, DOI: [10.1051/epjconf/20134006011](https://doi.org/10.1051/epjconf/20134006011).
19. Mishima, Tokushichi & Hasiguti, Ryukiti & Kimura, Yasuo. (1958). On the Magnetic Properties of Quench-Hardened Magnet Steel. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 22. 63-66. DOI: [10.2320/jinstmet1952.22.2\\_63](https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.22.2_63).
20. Tawara, Yoshio & Senno, Harufumi. (1973). Bulk Hardened Magnet of Nonstoichiometric Rare-Earth Cobalt. *Japanese Journal of Applied Physics*. 12. 761-762. DOI: [10.1143/JJAP.12.761](https://doi.org/10.1143/JJAP.12.761).
21. V. Rudnev and G. E. Totten, “Design and Fabrication of Inductors for Induction Heat Treating,” in *Induction Heating and Heat Treatment*, ASM International, 2014, p. 18, URL: <https://fluxtrol.com/inc/pdf/Design-and-Fab-of-Inductors-for-HT.pdf> .
22. Lusgin, V & Koptiyakov, Alexander & Petrov, A & Zinovev, K & Kamaev, D. (2018). Power supplies for dual-frequency induction melting of metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 313. 012008. DOI: [10.1088/1757-899X/313/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899X/313/1/012008).
23. H. R. Lowry and J. P. Wallace, “Electromagnetic levitation casting apparatus having improved levitation coil assembly.,” 1989, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/2e3526f9bc186508b478/EP0166346B1.pdf>.
24. Lee, Su-Yeon & Kim, Chang-Soo & Park, Jean-Ho & Lee, Jong & Kim, Su-Hee & Han, Yun-Sung & Lee, Hee-Sung. (2020). Study on the Direct Melting Extrusion Metal 3D Printing Using Induction Heating. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 29. 66-73. DOI: [10.7735/ksmte.2020.29.1.66](https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.1.66).

25. Aghaei, Maryam & Bogaerts, Annemie. (2015). Particle transport through an inductively coupled plasma torch: Elemental droplet evaporation. J. Anal. At. Spectrom..DOI: [31. 10.1039/C5JA00162E](https://doi.org/10.1039/C5JA00162E).
26. L. Siqing, L. Canfeng, and L. Qiwei, “Magnetic-field concentration in inductively coupled plasma reactors,” 2006, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a1/f5/bc/2ec53087e0204a/WO2006044419A2.pdf>.
27. Yan, Keping & Heesch, E.J.M. & Pemen, A. & Huijbrechts, P. & Laan, Piet. (2001). A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation. Review of Scientific Instruments. 72. 2443-2447. DOI: [10.1063/1.1367358](https://doi.org/10.1063/1.1367358).
28. Narayanaswamy, Venkateswaran & Raja, Laxminarayan & Clemens, Noel. (2010). Characterization of a High-Frequency Pulsed-Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control. Aiaa Journal - AIAA J. 48. 297-305. [10.2514/1.41352](https://doi.org/10.2514/1.41352).
29. Авторське свідоцтво SU 765900, H01H 33/66, 23.09.80
30. 林鹤云, 颜建虎, and 冯奕, “Flux switching type magnetic-concentration transverse flux permanent magnetic wind generator,” 2010, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ad/e7/ec/877b53e3a84b1a/CN101741197B.pdf>.
31. F. Volke and M. Benecke, “NMR imaging method and device focusing magnetic flux to a focal point in the imaging volume region,” 2009, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/16/37/87/975495e3626e18/US7518361.pdf>.
32. J. K. Hastings, M. A. Juds, and M. S. G., “Magnetic flux concentrator anti-differential current sensing topology,” 2007, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/82/d4/32/914581cbb0def7/US7157898.pdf>.
33. O. Yoshida, T. Maruyama, and K. Shirakubo, “Torque sensor and power steering system using the torque sensor,” 2016, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/81/94/f5/c77bd565becc0c/US9302700.pdf>.
34. P. Augier, E. Coupart, A. Eydelie, P. Gauthier, C. G.-M. Guillo, and Tl. Jadeau, “Rotating electrical machine with concentration flux rotor and teeth-wound stator,” 2001, URL:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/8b/b0/67/9d143afac2006e/EP1152516A2.pdf>.

35. S. Breban, V. Mester, and C. A. Oprea, “Axial flux permanent magnet electrical machine with magnetic flux concentration,” 2015, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/00/4d/7e/75489f9535eaaa/EP2869433A1.pdf>.

36. Kono, M., and P. H. Roberts. Recent geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field // Reviews of Geophysics. – 2002. – Т. 40, вып. 4. – С. 4– 1 – 4– 53. – doi:10.1029/2000RG000102.

37. P. J. Kapył, A. Brandenburg, N. Kleeorin, M. J. Kapył, and I. Rogachevskii, “Magnetic flux concentrations from turbulent stratified convection,” Astron. Astrophys., no. 588, 2015, DOI: [10.1051/0004-6361/201527731](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527731).

38. Brandenburg, Axel & Rogachevskii, Igor & Kleeorin, Nathan. (2016). Magnetic concentrations in stratified turbulence: The negative effective magnetic pressure instability. New Journal of Physics. 18. 125011. DOI: [10.1088/1367-2630/aa513e](https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa513e).

39. Jabbari, Sarah & Brandenburg, Axel & Losada, Illa & Kleeorin, Nathan & Rogachevskii, Igor. (2014). Magnetic flux concentrations from dynamo-generated fields. Astronomy and Astrophysics. 568. A112. DOI: [10.1051/0004-6361/201423499](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423499).

40. Лабораторный сверхпроводниковый соленоид с однородным магнитным полем и индукцией 9.2 Т / Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк // Физика и техника высоких давлений. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 149-154. – Бібліогр.: 5 назв. – рос.

41. L. Hoffmann and V. Scheuing, “Transformer coils for high magnetic fields,” 1963, DOI: [10.5170/CERN-1963-036](https://doi.org/10.5170/CERN-1963-036).

42. Разработка сверхпроводящих магнитных линз для фокусировки пучков легких ионов с энергией порядка 10 МэВ / В.И. Бутенко, О.С. Друй, Б.И. Иванов, В.О. Ильичева, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика, В.Б. Юферов // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 5. – С. 49-53. – Бібліогр.: 4 назв. – рос.

43. C. Kinman, "Magnetic flux concentrator for increasing the efficiency of an electromagnetic pickup," 2014, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/c7/d8/fb0a17a97a96e6/US8791351.pdf>.
44. L. W. Fullerton and M. D. Roberts, "System for concentrating and controlling magnetic flux of a multi-pole magnetic structure," 2016, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/fb/ae/6f/9fcaa98c24de7c/US9245677.pdf>.
45. Sun, Fei & He, Sailing. (2013). Static magnetic field concentration and enhancement using magnetic materials with positive permeability. Progress In Electromagnetics Research. 142. DOI: [10.2528/PIER13082102](https://doi.org/10.2528/PIER13082102).
46. Vincent Bruyere, "Tips and Tricks for Modeling Induction Furnaces," COMSOL INC., 2015. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/tips-and-tricks-for-modeling-induction-furnaces/>.
47. Shinohara M. (2007) Control of a Magnetic Fluid Drop Moving inside a Cylinder. In: Zhuang F.G., Li J.C. (eds) New Trends in Fluid Mechanics Research. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-540-75995-9\\_238](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75995-9_238)
48. Rosensweig, R. E. Ferrohydrodynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1985.
49. Сахаров А Д "Взрывомагнитные генераторы" УФН 88 725–734 (1966)
50. Patent US 5182424A. Frank V. Module encapsulation by induction heating, 31-10-1989.
51. K. Shimoni, Physikalische Elektronik. German, Stuttgart Teubner 1972, - p. 608.
52. C. H. Flurscheim, Ed., Power Circuit Breaker: Theory and Design, vol. 17, Stevenage: Stevenage : Peter Peregrinus, 1975, p. 555. ISBN:9780901223623.
53. Y. Batyhin, O. Sabokar, and V. Strelnikova, "INDUCTION HEATING IN HISTORY AND DEVELOPMENT. APPLICATION IN MODERN TRANSPORT REPAIRING TECHNOLOGIES," Automob. Transp., no. 40, pp. 75–79, 2017, URL: [https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/2002/1/AT\\_40\\_12.pdf](https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/2002/1/AT_40_12.pdf).
54. Y. Matsui and M. Shiozaki, "Large-capacity vacuum circuit breaker". USA Patent US8269586 B2, 18 September 2012. URL: HYPERLINK "http://www.google.ch/patents/US8269586"

55. S. Kantas, "Winding for a contact of a medium-voltage vacuum circuit-breaker with improved arc extinction, and an associated circuit-breaker and vacuum circuit-breaker, such as an AC generator disconnecter circuit-breaker". USA Patent US8835790 B2, 16 September 2014. URL: HYPERLINK "<https://www.google.tl/patents/US8835790>"

56. A. I. Kuzmichev, *Magnetronnyie raspyilitelnyie sistemyi* [Magnetron sputtering systems], Kyiv: Avers, 2008, p. 244. ISBN: 9668934075.

57. A. I. Kuzmichev and L. Y. Tsybulsky, «Termoemissionnyi ionizator parov meallov [Termoemission ionizer of metal vapor],» Herald of Khmelnytskyi national university, no. 6 (231), pp. 217-224, 2015. URL: HYPERLINK

"[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015\\_6/\(231\)%202015-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015_6/(231)%202015-6-t.pdf)".

58. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты : учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Е. Г. Акимов и др.] ; под ред. А.Г.Годжелло, Ю.К.Розанова. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 352 с

59. Markov A. M. Modern vacuum breakers // News of Pskov State University. Ser. Technical Sci. 2016. No. 6/ P. 110-116..

60. Gurevich, Alex. (2012). Superconducting Radio-Frequency Fundamentals for Particle Accelerators. Reviews of Accelerator Science and Technology. 5. 119-146. 10.1142/S1793626812300058.

61. Masson, P.J. & Netter, Denis & LГ©vГЄque, Jean & Rezzoug, A.. (2001). Magnetic field concentration: Comparison between several shapes of superconducting shields. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on. 11. 2248 - 2251. DOI: [10.1109/77.920307](https://doi.org/10.1109/77.920307).

62. D.R. Tilley and J. Tilley, Superfluidity and Superconductivity, Institute of Physics Publishing Ltd, Bristol 1990

63. D. W. Baarman, J. K. Schwannecke, and R. M. Taylor, "Flux concentrator and method of making a magnetic flux concentrator," 2014, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0a/b7/c3/15a8dcc876cc26/US8692639.pdf>.

64. Babat G., Losinsky M. Concentrator of Eddy Currents for Zonal Heating of Steel Parts, Journal of Applied Physics, volume 11, issue 12 – American Institute of Physics, 1940. – 816 c.

64. Kim Y.B., Platner E.D. Flux Concentrator for High-Intensity Pulsed Magnetic Fields, Review of Scientific Instruments, volume 30, issue 7 – American Institute of Physics, 1959. – 524 c.

65. B. Howland and S. Foner, Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields, MIT, 1961, p. 249 (John Wiley 1962).

66. Foner S., Kolm H. H., Rev. Sci. Instr., 28, 799 (1957). Coils for the Production of High-Intensity Pulsed Magnetic Fields.

67. B. HOWLAND, “FLUX CONCENTRATOR FOR HIGH INTENSITY PULSED MAGNETIC FIELDS,” 1964, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ae/1e/35/9ffdd5b2bdbac/US3124726.pdf>

68 H. Randolph and L. P. Wallace, “Electromagnetic levitation casting apparatus having improved levitation coil assembly,” 1989, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/00/66/fd/b35a6d96aa9d5d/EP0166346B1.pdf>

69 . E. Bachelet, “Levitating transmitting apparatus,” 1912, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/32/30/c9/e83cda2af387e1/US1020942.pdf>.

70. K. Bessho and M. Enokizono, “Eddy current type multilayered coil for generating intense AC magnetic field,” 1990, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/bf/c9/77/4ba7eafbf96890/US4933657.pdf>.

71. A. V. Kulikov, S. D. Ecklund, and E. M. Reuter, “SLC positron source pulsed flux concentrator,” in Proc. Particle Accelerator Conf., San Francisco, CA, 1991, pp. 2005–2006, SLAC-PUB-5473.

72. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. Электромагнитное поле. М.– Л., ОНТИ, 1936. 304 с. с ил.

73. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч. III. М.– Л., Энергоиздат. 1948. 343 с. с ил.

74. Pirani M. Principles of Vacuum Engineering / M. Pirani, J. Yarwood // - London : Chapman and Hall, 1961. – 521 p.

75. Пат. 3330252 США, МКИ C23C 14/04. Masking device / P.E. Oberg. – Оpubл. 11.07.1967, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>

76. Пат. 3793070 США, МКИ H01L 21/00; H01L 31/18; H01L 007/36. A method of varying the carrier concentration of lead-tin sulfide epitaxial films / Метод изменения концентрации носителей в эпитаксиальных пленках сульфида свинца-олова / R.V. Schoolar. – Оpubл. 19.02.1974, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.

77. Spalvins T. Industrialization of the ion plating process / T. Spalvins // Research Development. – 1976. – Oct. – P. 45–48.

78. Яффе Л.Б. Изучение самопоглощения с помощью проточного пропорционального 4□□□-счетчика / Л.Б. Яффе, Ж.В. Фишман // Метрология ионизирующих излучений (вопросы радиометрии) : симпозиум МАГАТЭ, Вена, 14-16 октября 1958 г. : сб. докл. – М. : Госатомиздат, 1962. – С.138–151.

79. Пат. 4791261 США, МКИ C23C 14/26; H05B 6/02; H05B 6/24; H05B 006/24. Crucible for evaporation of metallic film/ Тигель для испарения металлической пленки / R.R. Phinney, D.C. Strippe. – Оpubл. 13.12.1988, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.

80. Амес И. Тигельный испаритель алюминия / И. Амес, Л.Х. Каплан, П.А. Роланд // ПНИ. – 1966. – № 12. – С. 100–101.

81. Пат. 3371649 США. МКИ C23C 14/32; H01C 17/075; H01J 37/317; H01C 17/08; H01C. Means for controlled deposition and growth of polycrystalline films in a vacuum / Устройство для регулируемого осаждения и выращивания поликристаллических пленок в вакууме / H.E.T. Gowen. – Оpubл. 5.03.1968, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.

82. Лютович А.С. Исследование процесса легирования эпитаксиальных слоев Si цинком и кобальтом при росте из ионно-молекулярных пучков / А.С. Лютович, М.Ю. Карджаубаев // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1981. – Т.17. – №3. – С.389–391.

83. Лютович А.С. Низкотемпературная эпитаксия кремния из ионно-молекулярных пучков в вакууме / Лютович А.С, Клименко К.Ф. // – В кв.: Синтез и рост совершенных кристаллов и пленок полупроводников. – Новосибирск : Наука, СО, 1981. – С. 62–66.



84. Cardenas R. High-frequency induction heating in a vacuum system / R. Cardenas, G. Yancey, D. Meyer // J. Vac. Sci. Technol. – 1979. – V.16. – №1. – P.91–92.
85. Пат. 53-9191 Японии. НКИ 13/7/Д61, 12А25. МКИ С23С 13/08. Устройство ионного осаждения. – Опубл. 1973.
86. Установки индукционного нагрева / под ред. А.Е. Слухоцкого, – Л. : Энергоиздат, 1981. – 326 с.
87. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М., Изд-во АН СССР, 1958. 472 с. с ил.
88. Носов Ю. Р., Петросянц К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Сов. радио, 1976. 304 е.
89. Норенков, И. П. Основы теории и проектирования САПР : учебник для вузов / И. П. Норенков, В. Б. Маничев. - Москва : Высшая школа, 1990. - 334 с. : ил. - Библиогр.: с. 328. - ISBN 5-06-000730-8 : 1.10 р.
90. Цибульский Л.Ю. Физико-топологическое моделирование индукционного испарителя металлов // "Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування". – 2015, № 63., с. 20-32 .
91. Tsybulsky L. Numerical calculation of temperature distribution in crucible of induction evaporation with magnetic field concentrator// Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування". – 2015. - Вип. 50(2). - с. 98-107.
92. Study of transient processes in a p-i-n photodetector using the nonstationary physical-topological model. DOI: [10.1134/S1063739717030064](https://doi.org/10.1134/S1063739717030064)
93. ДСТУ ISO 5807:2016 Обробляння інформації. Символи та угоди щодо документації стосовно даних, програм та системних блок-схем, схем мережевих програм та схем системних ресурсів (ISO 5807:1985, IDT)
94. Математические методы моделирования формирования и транспортировки ионных пучков / В. С. Болдасов, Б. И. Волков, А. Г. Свешников, Н. Н. Семашко.– Вестн. Москов. ун-та. Сер. Вычисл. математика и кибернетика, 1978, № I, с. 3– 14.
95. Носов Ю. Р., Петросянц К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Сов. радио, 1976. 304 с.



96. Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Поталицин Ю. Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1979. 176 с
97. Болдасов В. С., Кузьмичев А. И., Шендаков А. И. О подскоке потенциала плазменного эмиттера при пробое ускоряющего промежутка. – В кн.: Тез. докл. Всесоюз. симпоз. по ненакаливаемым катодам. Томск, 1980, с. 94–95
98. Кузьмичев А. И. Деионизация при наличии тока через плазму. – Вестн. Киев, политехи, ин-та. Сер. Радиоэлектроника, 1979, вып. 16, с. 59 – 64.
99. Кузьмичев А. И. Моделирование управления пробоем в приборах с плазменным катодом. – Вестн. Киев, политехн. ин-та. Сер. Радиоэлектроника, 1979, вып. 16, с. 125–128.
100. Shimoni K. Physical electronics. Moscow: Energiya, 1977. 608 p
101. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера, Изд.2-е, стереотип. / В.П. Сигорский // – К. : Техника, 1977. – 768 с.
102. <https://www.ansys.com/>
103. <https://www.comsol.com/>
104. Эстербю О. Прямые методы для разреженных матриц : пер. с англ. / О. Эстербю, З. Златев // – М. : Мир, 1987. – 120 с.
105. Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / Edited by G. Hall and J.M. Watt. – Oxford : Clarendon Press, 1976. – 336 p.
106. Nemkov V. S. Role of Computer Simulation in Induction Heating Techniques : Proceedings of the International Induction Heating Seminar, 13–15 May 1998 j., Padua, Italy / Edited by S. Lupi. – Padua: S.G.E., 1998. – P. 301 – 309.
107. Сарапулов Ф.Н. Разработка программных средств для математического моделирования МГД-установок / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, О.Ю. Сидоров, Б.А. Сокунов // Вопросы совершенствования электротехнического оборудования и электротехнологий : сборник статей. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – № 8. – 290 с.
108. Сарапулов Ф.Н. Расчет мощностей и электромагнитных сил в установках индукционного нагрева: учебное пособие / Ф.Н.Сарапулов // – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – 89 с.
109. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О.Зенкевич, К.

Морган // – М. : Мир, 1986. – 318 с.

110. Стренг Г. Теория метода конечных элементов: Пер. с англ. / Г. Стренг, Дж. Фикс // – М. : Мир, 1977. – 352 с.

111. Sablic M. J. An alternative numerical approach of computing eddy currents: case of the double – layered plate / M.J. Sablic, R.E. Beissner, A. Choy // IEEE Trans. on Magnetics. – 1984. – V. MAG-20. – № 3. – P. 500–506.

112. Reichert von K. A numerical method to calculate induction heating installations / Reichert von K // Elektrowärme int. – 1968. – Bd.26. – № 4. – P. 113–123.

113. Полеводов Б.С. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в индукционных плазмотронах / Б.С. Полеводов, В.Б. Демидович, Ю.А. Скворцов // Известия Вузов : Электромеханика. – 1984. – № 9. – С. 13–21.

114. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков В. Б. Демидович // – Л.: Энергоиздат, 1988. – 280 с.

115. Джордж А. Численное решение больших разреженных систем уравнений: пер. с англ. / А. Джордж, Дж. Лю // – М. : Мир, 1984. – 333 с

116. Эстербю О. Прямые методы для разреженных матриц : пер. с англ. / О. Эстербю, З. Златев // – М. : Мир, 1987. – 120 с

117. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. The Finite Element Method. Volume 1: The Basis – Butterworth-Heinemann, 2000 – p. 43

118. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин // – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.

119. Дешман С. Научные основы вакуумной техники / С. Дешман // – М. : Мир, 1964. – 715 с.

120. Shackelford J.F. Materials Science and Engineering Handbook / J.F. Shackelford, W. Alexander // – Boca Raton : CRC Press LLC, 2011. – 1928 p.

121. Жидкие металлы и шлаки : справочник / В.Н. Андронов, Б.В. Чекин, С.В. Нестеренко // – М. : Metallurgia, 1977. – 127 с

122. Исаченко В.П. Теплопередача : учебник для вузов. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // – 3-е изд. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

123. Теплофизические свойства металлов при высокой температуре : справ. изд. / Зиновьев В.Е., М: Metallurgia. 1989. - 384 с.

124. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справ. изд. / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1981. – 400 с.
125. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэл // – М.: Мир, 1975. – 935 с.
126. Михеев М.А. Основы теплопередачи. / М.А. Михеев, И.М. Михеева // – 2-е изд., стереотип. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
127. Голубева Ирина Львовна. Интегральные нормальные степени черноты жидких металлов и сплавов : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Голубева Ирина Львовна – Казань, 2005. – 156 с. – Библиогр. : с. 147–156.
128. Самсонов Г.В. Свойства элементов. В 2 ч. Ч1. Физические свойства : справочник / Г.В. Самсонов // – М. : Metallurgy, 1976. – 600 с.
129. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration // Bull. Amer. Math. Soc., 1943. – V. 49. – P. 1–43.
130. Сарапулов Ф.Н. Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем. Методы расчета : учеб. пособие / Ф.Н. Сарапулов, О.Ю. Сидоров // – Екатеринбург : УГТУ, 1994. – 206 с.
131. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В.К. Щукин // – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
132. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения : учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак // – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. – 236 с.
133. Беспалов В.Я. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / В.Я. Беспалов, Е.А. Дунайкина, Ю.А. Мощинский // Под ред. Б.К. Клокова. – М. : МЭИ, 1987. – 72 с.
134. Кузьмичев А.И. Массоперенос из линейно-дискретного источника на движущуюся линейно подложку / А.И. Кузьмичев, А.Э. Нусупов, Л.Ю. Цыбульский // Вестник КПИ. Серия : Радиоэлектроника. – 1989. – Вып. 26. – С. 89–92.
135. Smith D.L. Thin-Film Deposition: Principles and Practice / D.L. Smith // – Singapore : McGraw-Hill Co., 1997. – 616 p.
136. The characteristics of electrical discharges in magnetic field / Ed. by

A. Guthrie, R. K. Wakerling. – N.-Y.: Mc.Grow-Hill, 1949. – 563 p.

137. Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007 – С. 289-295

138. Технология СБИС. Кн.2 / К. Могёб, Д. Фрейзер, У. Фичтнер и др. // – М.: Мир, 1986. – 453 с.

139. Ю.А. Березин, В.А. Вшивков, Метод частиц в динамике разреженной плазмы – Новосибирск: Наука, 1989

140. PIC simulation code “MAGIC” // Orbital ATK, [электронные ссылки] <http://www.mrcwdc.com/magic/description.html>

141. T.M. Undagoitia, L. Rauch. Dark matter direct-detection experiments. arXiv:1509.08767, 2015 [электронная ссылка] <http://arxiv.org/abs/1509.08767>

142. Быстрицкий В.М. и др., Стационарная установка для обнаружения взрывчатых веществ на основе метода меченых нейтронов // Письма в ЭЧАЯ – 2013 – т. 10, №5 – С. 722-729

143. Ю.П. Райзер, Физика газового разряда, Долгопрудный: Издательство «Интеллект», 2009, С. 63-70.

144. Lieberman V.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharge and Material Processing. New York: Wiley, 1994.

145. Lotz W. // Z. Phys. 1970. V. 232. P. 101.

146. Kuzmichev A., Tsybulsky L., Evaporators with Induction Heating and Their Applications, In book: Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials.– InTech, 2011. – P. 269–302.

147. Кузьмичёв А.И., Цыбульский Л.Ю., Испарители с индукционным нагревом и их применение // Przegląd elektrotechniczny. (Poland). – 2008. – Т. 84. – № 3. – Р. 32–35.

148. Кузьмичёв, Л.Ю. Цыбульский., Индукционный нагрев в технологии получения и обработки микро– и нанодисперсных материалов.–В мат. Харьковской нанотехнологической Асамблеи. – Харьков, 2006. – Т.2. – С.50–59.

149. Воронов С.А., Цыбульский Л.Ю., Использование пучков нейтральных атомов в нанотехнологиях. Ч 1. Атомная оптика // Электроника и связь (Киев).–

2007. – Ч.1. – С. 46-49.

150. Воронов С.А., Цыбульский Л.Ю., Коллимация атомарных потоков индукционных испарителей для создания наноразмерных структур Ч. 2 // Электроника и связь. (Киев). – 2007.

151. Klaers Jan, Schmitt Julian, Vewinger Frank, Weitz Martin Bose–Einstein condensation of photons in an optical microcavity // Nature. — 2010. — V. 468. — P. 545—548.

152. А.И. Кузьмичев, Л.Ю. Цыбульский, Термоионное устройство с индукционным испарителем, ПТЭ. – 1992. – №2. – С.262-264

153. Y. A. Krasnyatov, E. V. Startseva, V. A. Lavrinovich and V. Y. Ushakov, «Vakuumnyi vyiklyuchatel toka [Vacuum Circuit Breaker]». Russian Federation Patent RU2400855C1, 27 September 2012.

URL: HYPERLINK "<https://patents.google.com/patent/RU2400855C1/ru>"

154. A. G. Godzhello and Y. K. Rozanov, Ed., Elektricheskie i elektronnye apparaty. T. 1 Elektromehaniicheskie ustroystva [Electrical and electron apparatuses. Vol. 1 Electromechanical apparatuses], Moscow: Publ. Center “Academia”, 2010, p. 352..

155. M. A. M., «Sovremennyye vakuumnyie vyiklyuchatel [Modern vacuum breakers],» News of Pskov State University. Ser. Engineering sciences, no. 6, pp. 110-116, 2016.

156. E. Dong, T. Qin, Y. Wang, X. Duan and J. Zou, "Experimental Research on Speed Control of Vacuum Breaker," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2594-2601, October 2013.DOI: HYPERLINK

"<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264949>.

157. D. I. Ivanchenko and N. G. Novozhylov, "Vacuum breaker simulation for switching overvoltage study," in Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallinn, Estonia, 2016.DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724126>.

158. A. Nazaryichev, A. Surovov, V. Chayka and A. Tadzhibaev, «Perspektivy primeneniya vakuumnyih vyiklyuchateley 110–220kV [Prospects for the use of vacuum circuit breakers 110-220kV],» 01 September 2010. [Internet]. Available: HYPERLINK

"[http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy\\_primeneniya\\_vakuumnyx\\_vyklyuchatelej](http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy_primeneniya_vakuumnyx_vyklyuchatelej).

## ДОДАТКИ

## Акт впровадження у навчальний процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор КПІ ім. Ігоря Сікорського  
академік НАН України,  
д.т.н., проф. Якименко Ю.І.

Вихідний № \_\_\_\_\_

від \_\_\_\_\_ 2020 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
випускника аспірантури кафедри електронних пристроїв та систем Національного  
технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» Майкута С.О. у навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, декан факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського д.т.н., проф. Жуйков В.Я., зав. кафедрою електронних пристроїв та систем д.т.н., проф. Ямненко Ю.С., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю., склали цей Акт про те, що результати дисертаційної роботи Майкута С.О. «Фізико-топологічне моделювання приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля» впроваджені у навчальний процес кафедри електронних пристроїв та систем. У дисципліні «Технологічні основи електроніки» відображені принципи побудови та характеристики випарників металів з індукційним нагрівом, розділ «Отримання металевих плівок методом конденсації з парової фази. Типи і конструкції випарників». У дисципліні «Плазмова та імпульсна електроніка» відображені прояви ефекту скін-шару у змінному магнітному полі, розділ «Методи та засоби вимірювання параметрів імпульсних процесів».

Декан факультету електроніки



д.т.н., проф. Жуйков В.Я.

Зав. каф. електронних пристроїв та систем



д.т.н., проф. Ямненко Ю.С.

Професор каф. електронних пристроїв та систем



д.т.н., Кузьмичев А.І.

Доцент каф. електронних пристроїв та систем



к.т.н., Цибульський Л.Ю.



## Акт впровадження на підприємстві



**Державний концерн «Укроборонпром»  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ЗАВОД «ГЕНЕРАТОР»**

Україна, 04080, м. Київ, вул. Новокостянтинівська, 18  
 тел: (044) 425-00-28, (044) 413-94-24, факс: (044) 205-97-27, (044) 412-04-20  
 e-mail: generator@ukroboronprom.com http://www.generator-ukraine.com

16.12.2020 № 50/1499

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_



В.П.ЯРМОШИК

20 р.

**АКТ**

**Впровадження технологічної інструкції ВЧ керування  
потокami електронів**

Під час виконання НДДКР "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення (Державний реєстраційний номер: 0119U103973) був виготовлений лабораторний зразок для індукційного управління електронними потоками у вакуумному вимикачі струму, проведені випробування та зроблені порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень лабораторного зразка.

Отримано дані про зміну направленості електронного потоку в залежності від конструкції ВЧ концентратора електромагнітного поля вакуумного вимикача. Встановлено, що розбіжність між чисельними розрахунками конструктивних та режимних параметрів та фізичними експериментами склала не більше  $\pm 2,5\%$ .

Розроблена технологічна інструкція, яка дозволить моделювати управління електронними потоками, і може бути використана при розробці електровакуумних і газорозрядних приладів, та вакуумних вимикачів.

Радник директора, ктн

В.П.ДЗЮБА

Головний конструктор

В.Т.ПРОКОПЕНКО